高等学校教材

普通物理实验

（三、光学部分）

第三版

杨述武　主编
王定兴　　编





高等教育出版社

高等学校教材

普通物理实验

（三、光学部分）

第三版

杨述武 主编
王定兴 编

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 (3):光学部分/杨述武主编. —3 版. —北京:高等教育出版社,2000 (2001 重印)

高等学校教材

ISBN 7-04-007947-X

Ⅰ.普… Ⅱ.杨… Ⅲ.①物理学-实验-高等学校-教材 ②光学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 67324 号

普通物理实验(三、光学部分) 第三版

杨述武 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009

电 话 010—64054588 传 真 010—64014048

网 址 http://www.hep.edu.cn

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32 版 次 1983 年 6 月第 1 版

印 张 9.125 2000 年 5 月第 3 版

字 数 220 000 印 次 2001 年 1 月第 2 次印刷

定 价 9.10 元

内 容 提 要

《普通物理实验》一套共4册，分别为力学及热学部分，电磁学部分，光学部分，综合及设计部分，是在第2版前3册的基础上增订而成的．全书保持了原书通用性好、可读性强及注重能力培养的特色．同时，为了更好地适应教学需要，修改了前3册部分实验的论述；并增加了第4分册，专门推出一批较成熟、易推广的综合及设计性实验．本次修订时还改正了原书中的一些错误，并根据最新的有关国家标准和规范统一了有关名词、单位和符号，从而使全书更加科学化和规范化．

本书是这套书的第3分册，为光学部分，共计24个实验．可作为高等学校本科物理及相近专业普通物理实验课的教材，也可供师专及卫电使用．

第三版前言

本书自1990年修订之后，发现有些地方修订不细，承高等教育出版社大力协助，又进行了一次修订工作，主要工作有：

1. 根据全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词(1996)》订正、统一了有关名词；

2. 对测量的评定，一律改用“标准不确定度”；

3. 修改了一部分实验的论述，订正了发现的错误．

我们感谢读者给予的支持，希望读者继续对本书提出批评和建议．

编　者

1997年秋

第二版前言

本书是在第一版的基础上，参照1989年国家教委高等学校理科物理学教材编审委员会物理实验编审小组拟订的《综合大学、师范院校普通物理实验教学基本要求》(由国家教委高教司印发，供试行．见(89)教高司字122号文)，以及近十年来，我国物理实验教学的发展情况，组织修订的．

第二版基本保留了第一版的实验，并增加了几个实验，共有实验24个．以下对此次修订工作做几点说明：

1. 增加绪论部分　主要介绍光学实验的特点、观测方法、常用光学仪器的结构与调节以及使用中的注意事项等问题，另外为了学生使用方便，也简要介绍了数据处理的基础知识．

2. 加强了实验原理及仪器调节的说明　主要是希望学生在更好地了解实验原理和仪器调节问题的基础上，能独立地进行实验．

3. 增加了一些实验的具体内容　有些实验的内容增加了．我们考虑学校的情况不同，同一学校中的学生也有差异，适当多安排些，可供指导教师和学生去选择．

4. 实验步骤适当简化　主要是促使学生在理解实验的基础上，能比较独立地做实验．

5. 修改了部分名词　参照全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词——基础物理学部分(1988)》，对本书所用物理名词进行了修订，主要有：

修　改　前	修　改　后
读数显微镜	移测显微镜
第一、第二焦点	物方、像方焦点

续表

修　改　前	修　改　后
主平面	主面
平行光管	准直管
光栅常数	光栅常量
普朗克常数	普朗克常量
1/2 波片	半波片

6. 在绪论之前增加“致学生读者” 在“致学生读者”中提出：为什么要做实验，怎样才能做好一个实验，怎样才算做好一个实验，以便启发学生勤思考．

7. 操作与分析并重　实验中训练学生的操作技能是很重要的，但是为培养学生的能力，必须加强实验中分析问题和解决问题能力的训练，实验的安排、现象观察、仪器调节、数据分析和结果的评价，都要结合所学的理论去分析判断，我们期望学生能结合动手与动脑的活动，全面提高实验的能力．

本书在修订时，曾参考复旦大学贾玉润、王公治、凌佩玲主编的《大学物理实验》(复旦大学出版社，1987)及其它有关教材，并吸收了使用本书的指导教师的意见．

高等教育出版社曾建庭同志，山东大学物理系孟尔熹同志，苏州大学物理系和东北师范大学物理系的许多教师，对本书的修订给予了很大的支持和帮助，我们深表谢意．

本书在修订过程中，虽然做了许多调查和探索，但是限于我们的能力，难免存在缺点和错误，希望使用此书的教师和学生，继续提出宝贵意见，谢谢．

杨述武

1991 年 7 月于长春

致学生读者

同学们即将开始上光学实验课，在光学课中你们已经看过教师做的演示实验，那是些物理内容很丰富又很有趣的实验，现在要自己独立去做，在开始实验之前，请你们考虑一下：

1. 为什么要做实验？
   - 教学计划规定的任务？
   - 为了配合理论学习，加强对理论的认识？
   - 对实验有兴趣？
   - 将来工作的需要？
   - 学习一些实验方法和技术？
   - 为使自己成为科学、技术专家打基础？
   - …………
2. 怎样才能做好一个实验？
   - 认真按指导书去做？
   - 明确实验的物理内容，具体要求和注意事项？
   - 边做边分析，分析观察的现象正常否，数值合理否？
   - 注意仪器的性能、调节和操作？
   - 明确误差的来源，注意控制误差的引入？
   - …………
3. 怎样才算做好一个实验？
   - 教师点头？
   - 数值不是很理想，但是有分析，对问题比较明确？
   - 对实验的物理思想比较明确，对实验的特点有体会？
   - 对实验误差的认识比较明确，对控制误差的产生有体会？
   - 对数据处理方法运用得恰当，结果的表示符合实际？

· 对仪器的了解比较深入,操作很正确?

· 对实验仪器的选择、实验条件的规定及有关参量的安排有明确认识?

· 对实验和理论的关系有新的体会?

· 对实验的兴趣增加了,对独立完成一个实验增加了信心?

· …………

上述的三类问题,如能注意思考,将对提高你的物理实验能力很有帮助.

目　　录

绪论——光学实验基础知识

§1 光学实验的内容和特点

§1-1 光学实验的内容

光学和其它学科一样,也是经过长期的实践,在大量的实验基础上才逐步发展和完善的,它所建立起的经典光学理论和实验方法,在促进生产发展和社会进步的历史过程中,已经发挥了重要的作用. 虽然近几十年来,现代光学的发展特别迅速,理论的成果和新型光学实验技术的内容十分丰富,但是经典的实验方法仍然是现代物理实验方法的基本内容,因此,作为基础的光学实验课,学习的重点仍应该是学习和掌握光学实验的基本知识、基本方法以及培养基本的实验技能,通过研究一些基本的光学现象,加强对经典光学理论的理解,提高对实验方法和技术的认识.

为了反映科技进步,对于现代光学中的新概念和新型实验技术,我们也将通过激光全息照相和空间滤波等实验课题来拓宽视野,并初步了解现代光学实验技术的发展和应用.

光学实验应该学习和掌握的内容是:

1. 学习光学中基本物理量的测量方法

光学中的基本物理量有透镜的焦距,光学系统的基点,光学仪器的放大率和分辨率,透明介质的折射率及光波波长等. 在学习实验方法时,要注意它的设计思想、特点及其适用条件. 在测量过程中,要注意观察和分析所发生的各种光学现象,注意其规律性,以加深和巩固对所学理论知识的理解,并善于运用理论指导自己

的实践. 例如观察偏振现象,正确地分析和判断光波的偏振态及完成各种偏振态所需要的测量,以提高解决实际问题的能力.

2. 学会使用一些常用的光学仪器

光学实验中的常用光学仪器有光具座、测微目镜、望远镜、分光计、干涉仪、摄谱仪等. 学会使用光学仪器的内容,包括了解仪器的构造原理及正常使用状态,调节到正常使用状态的方法,操作要求,注意事项,并具有较好的操作技能.

3. 学习分析光学实验中的基本光路

光学实验中的光路,是每一个实验设计思想的具体体现,它是由许多的基本光路所组合而成的. 常用的基本光路有自准直光路、助视放大光路、恒偏向光路、分束光路、激光束准直光路等,要学会分析每一基本光路在整个实验中的作用,了解光路组成元件的参量对实验产生的影响、基本光路之间的衔接配合的要求等等,还要练习应用这些基本光路,设计一些简单的测试实验,以锻炼我们的实践能力.

如果对实际光路的理解没有清晰的物理图象,很可能为实验中出现的干扰所困惑. 通过实践,可以学习排除干扰,提高观测效果的方法. 如怎样判断"假象",怎样减少背景光的干扰,怎样按照光路的基本特征,又快又好地观察到测试目标……,这对于提高发现问题、分析问题、解决问题的实际能力,是十分重要的.

4.继续学习分析误差的方法和提高对实验数据的处理能力

在光学实验中,要继续提高对实验数据的处理能力和对实验结果误差原因的分析水平,力求正确地表达和评价实验结果. 分析误差产生的原因以及减小实验误差的有效途径,不仅能加深对实验理论的认识, 也必然会加强对测量方法和选择仪器的理解.

当然有意识地提高实验素养,培养良好的实验习惯和科学作风,应贯穿在整个学习过程中.

§1－2　光学实验的特点

1. 实验和理论密切结合

众所周知，光波的本质是频率极高的电磁波．例如可见光的频率为10^{14}Hz的数量级，即在10^{-9}s的时间内，光扰动就有几十万次之多，而实验只能测定在观察时间内的平均效果．因此在光学实验中，必须应用理论知识来指导实践．如果不掌握光的基本理论，不熟悉光源发光的宏观特性，不了解光波的相干性和偏振态，有些光学实验（如干涉）将很难做好，而有些光学实验（如偏振）甚至无法进行．对于光学元件的选择、实验光路的合理布置、光学实验现象的观察、寻觅和判断、光学仪器的调节和检验等问题，实验者必须把实验和理论密切地结合起来，尊重实际，详尽观察和记录各种光学现象及其出现的条件，结合理论，经过思考，做出正确的分析和解释，只有这样，才能巩固和加强对理论知识的理解，提高实验的兴趣，增长实验的才干，扩大实验的收获．

2. 仪器调节的要求较高

光学实验中使用的仪器一般比较精密．像分光计、迈克耳孙干涉仪等的测量精密度都较高，但要能充分发挥仪器测量的高精度，必须在仪器使用前，将仪器按照要求调节好．光学仪器的调节，不仅是一项基本的实验操作，而且包含着丰富的物理内涵，必须在详细了解仪器性能和特点的基础上，建立起清晰的物理图像，才能选择有效而准确的调节方法，根据观察到的现象，检验和判断仪器是否处于正常工作状态，提出应该采取的解决办法．这也只有在理论指导下，通过反复耐心的实验操作训练，才能切实地掌握．对此，实验者绝不能存有侥幸心理，盲目地实践，否则，轻者会影响实验的正常进行，重者将导致精密仪器性能的下降，甚至损坏仪器．

3. 要求较高的实验素养

光学实验还有一个特点，就是很多光学测量都是实验者通过

对仪器的调整，对目标的观察和判断以后进行读数的，因此实验者理论基础、操作技能的高低、判断准确程度，都将使测量数据具有不同的偏离和分散，从而影响测量结果的可靠性．因此实验者必须在实验过程中，注意不断提高实验素养，尽力排除“假象”和其它因素的干扰，力求客观而正确的反映实际．

另外，为了取得较好的实验效果，减少环境杂散光的干扰，有的光学实验须在低照度环境下进行．因此，要小心谨慎，安全操作，防止事故．要避免光学元件跌落损坏，仪器读数失误，并注意眼睛卫生，保护视力．

随着科学技术突飞猛进的发展，各个科研生产领域对光学实验技术提出了越来越高的要求，许多现代化的精密光学仪器的问世，不但促进了光学学科自身的发展，也为其它学科的发展，如天文、化学、生物和医学提供了重要的实验手段．应该看到，光学实验技术正发挥着日益重大的作用．

§2　光学实验观测方法

在普通物理的光学实验中，通常用自己的视觉器官(眼睛)对光学实验现象进行观察，这种观察方法不但简便灵活，而且具有很高的感光灵敏度，同时观察到的图像还有立体感和颜色的分布．这种通过人的视觉直接观察的方法，称为主观观察方法．但人眼观察有一定的局限性，有时必须采用光探测器和有关仪器的配合，来弥补人眼的不足，这种借助于仪器测量的方法，则称为客观测量方法．

§2－1　主观观察方法

1．人眼视觉

人眼本身就是一个成像的光学系统，见图0－2－1．观察者所看到的图像就是被观察的物体在人眼视网膜上所成的实像．在人

眼底的视网膜上分布有大量的感光细胞，感光细胞有圆柱细胞和圆锥细胞两种．圆柱细胞是分管暗视觉的，它不能产生颜色感觉，但它的感光灵敏度却比圆锥细胞高几十倍．圆锥细胞分管亮视觉，有颜色感觉和较高的分辨能力．它能分辨图像的细节，但灵敏度较差．因此，只有在足够亮（大于几个 $cd \cdot m^{-2}$）的情况下，锥状细胞起作用时，才会产生颜色的感觉．由于圆柱细胞不能使人眼明辨颜色，所以在黄昏时，所有物体看起来都是呈灰色的．

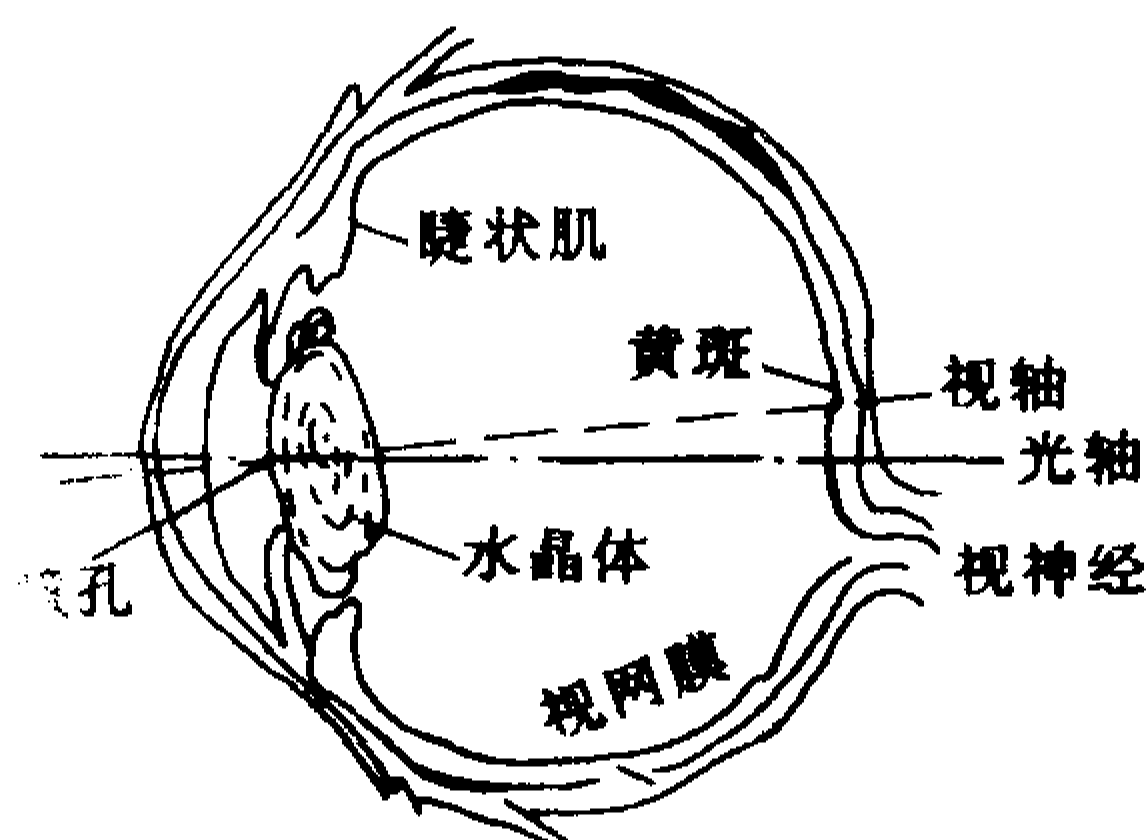


图 0－2－1

2．视见函数

人眼的视觉对于不同波长的光波灵敏度是不同的，一般情况下，人眼只能对 380～760 nm的可见光波产生视觉反应，它对绿光的感光灵敏度最高，而对红光的感光灵敏度则低得多．在正常的亮度（大于几个 $cd \cdot m^{-2}$）下，将测量结果画成曲线即如图 0－2－2 中实曲线 $V(\lambda)$ 所示．其最大值位于 555 nm 处，$V(\lambda)$ 又称为明视觉的视见函数．当亮度小于 0.01 $cd \cdot m^{-2}$ 时，视见函数则如图 0－2－2 中虚曲线 $V'(\lambda)$ 所示，称为暗视觉的视见函数，其最大值位于 507 nm 处．

3．人眼的亮度感觉

人眼所能感觉的亮度范围是非常宽的，其上下限之比可达 $10^{12}:1$，即光辐射通量变化的范围在 2×10^{-5} J/s 至 4×10^{-17} J/s 之间，均能为人眼所感受．这后一数值相当于每秒钟可观察到几十个光子流（对

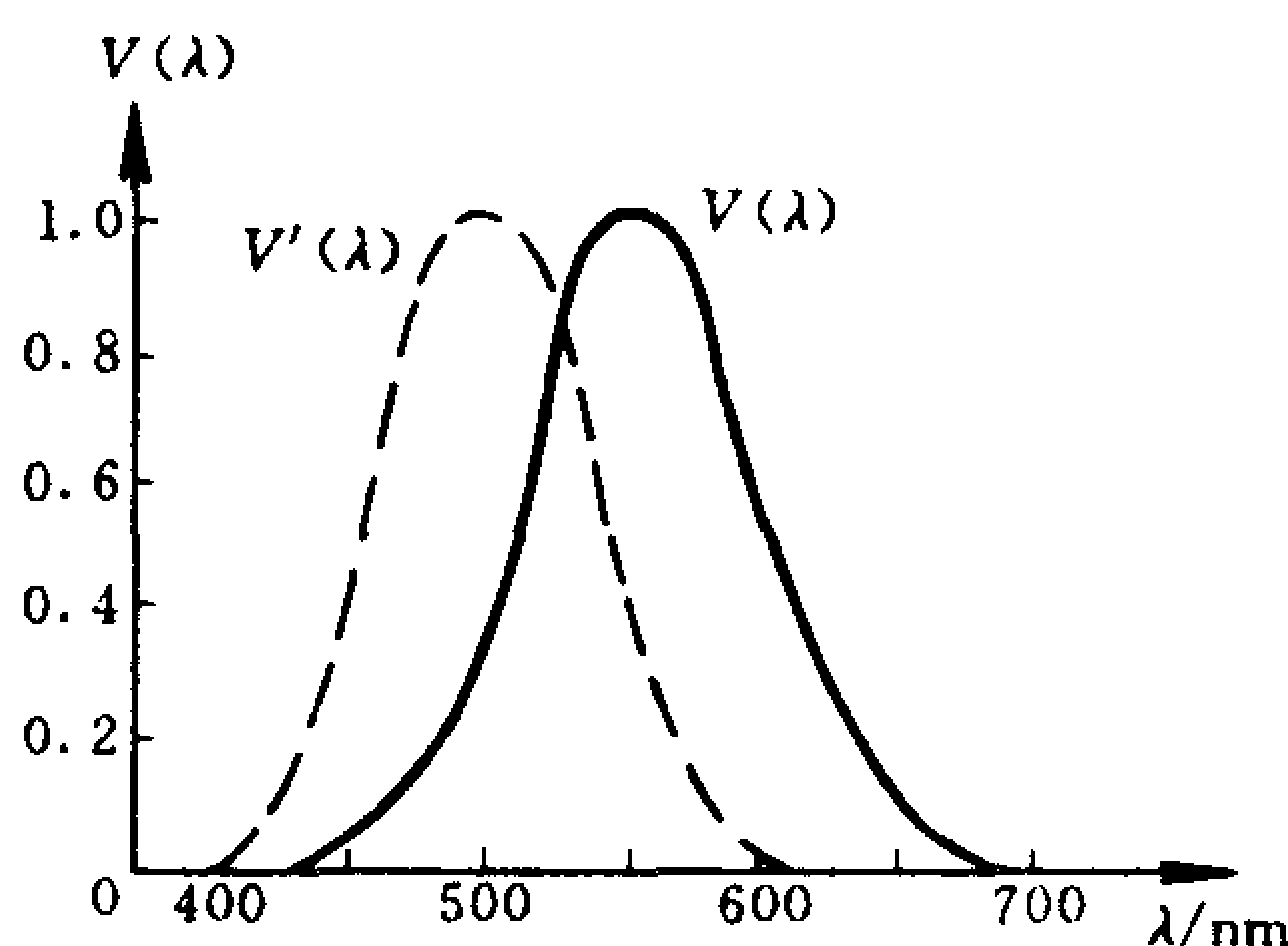


图 0-2-2

λ=500 nm). 这种观测范围跨越了十二个数量级的光探测器,是任何其它探测器所无法比拟的. 但是,人眼并不能同时感受这样大的亮度范围,当人眼适应了某一环境下的平均亮度后,视觉范围也就有了一定的限制. 在正常的亮度时,人眼所能区分的亮度上下限之比为 10^3:1,当平均亮度很低时,此值将降至10:1.

4. 人眼的分辨特性

当人眼观察物体上相隔一定距离的两物点时,如果选定的两物点靠得很近,视角减小到一定程度,人眼就不再能分辨出是两个独立的物点,而只感觉是连在一起的一个物点. 这说明人眼分辨景物细节的能力有一极限值,这种分辨细节的能力称为人眼的分辨力.

在正常照度下,人眼黄斑区的最小分辨角约为 1′. 当物体与环境背景的亮度相近时,分辨力也会降低.

5. 人眼的错视觉

图 0-2-3 中线段 AB 和 CD 的长度相等,但由于附加的箭头方向相反,结果造成观察时的视觉是 CD 长,AB 短. 即人眼视觉对自然现象作出主观判断时,可能出现某种假象,为此,通常应用其它的科学的方法进行

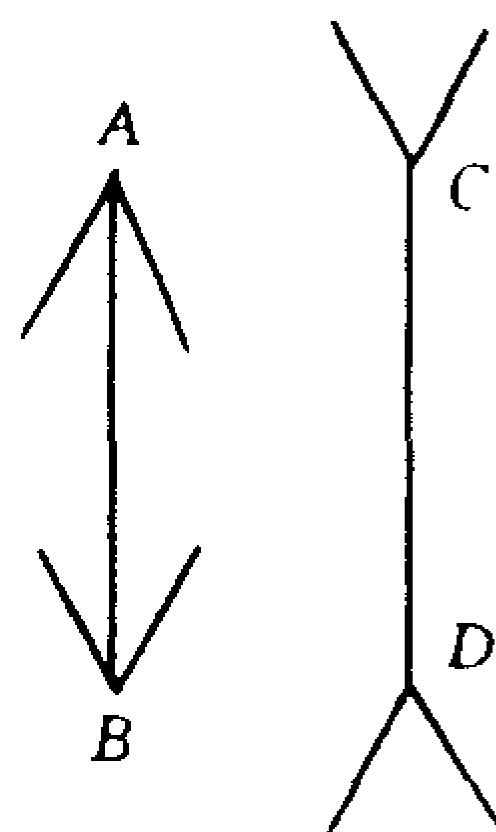


图 0-2-3

客观的检验，以期得出正确的结论.

6. 视差

视差问题在力学、电学实验中已有介绍，在那里主要是讲从仪器上读数时要注意防止视差，以保证读数的准确性. 在光学实验中除要注意读数时的视差问题外，还利用视差现象进行如下判断：

(1) 被观察的物与像，或像与像是否重合？

(2) 如果未重合，那末哪个离观测者近一些？这种判断对于指导仪器的调节，确定像的位置很有帮助.

如图 0-2-4 所示，人们在观察远近不同的物体 A 和 B 时，常会发生视觉差异的现象，称为视差. 当观察者的眼睛 E 沿着垂直于 AB 连线向右(或左)移动时，将观察到物体 A 和 B 之间有相对运动. 距离近的物体 A 的移动方向与观察者眼睛移动的方向相反即向左(或右)，而距离远的物体 B 的相对移动方向与观察者眼睛的移动方向相同即向右(或左). 如果物体 A 和 B 离观察者眼睛的距离相等，则当观察者眼睛左右移动时，A 和 B 之间将不产生相对运动. 因此，根据视差的现象，可以帮助我们准确地判断 A、B 的远近及是否共面.

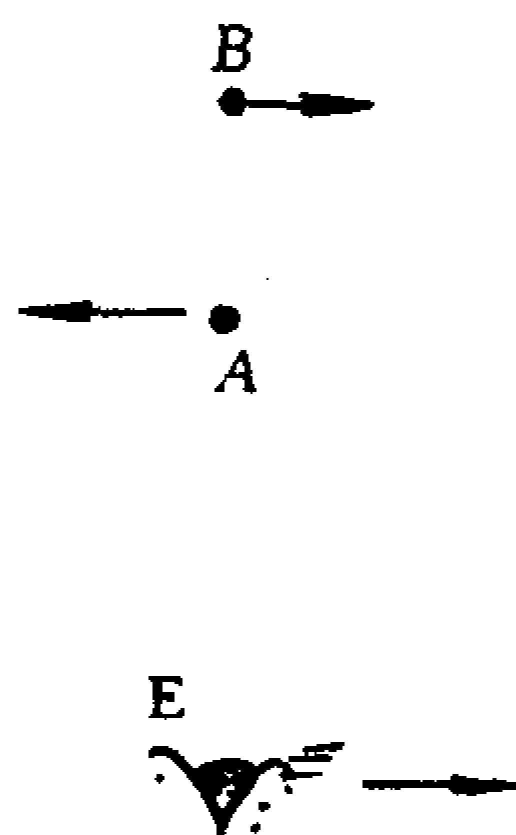


图 0-2-4

在普通物理的光学实验中，常通过助视光学仪器(测微目镜，显微镜，望远镜等)来测量物像的大小，这就必须使像和助视光学仪器中的测量准线(叉丝)对准，并同处一个平面上，即要求两者之间不存在视差. 没有视差，是所有助视测量仪器已调节好的标志. 所以在使用光学测量仪器时，只有做到测量准线和被测目标之间无视差地对准，才能发挥仪器应有的性能.

§2-2 客观测量方法

人眼作为常用的光探测器的特点和局限已如前所述，对超出

可见光范围的光学现象或对光强测量有较高的精度要求，则需要采用其它设备作光探测器，进行客观测量，以弥补人眼的不足.

常用的光探测器均为光电子器件，系应用固体材料并根据光电效应而制成，故又称光电探测器. 它将待测的光讯号转变为电讯号，配合适当的测量电路进行测量，因而测量比较客观、灵敏和精确.

1. 光电探测器的选择和使用

光电探测器的主要性能是：

光谱灵敏度 $S(\lambda)$　光电探测器对光波探测的灵敏度随入射光波的波长变化而变化. 探测的相对灵敏度(最大值定为1)按波长的分布函数就称为相对光谱灵敏度 $S(\lambda)$. 从函数曲线便可了解该探测器的工作波长范围、光谱响应的峰值波长和探测极限波长等特性.

积分灵敏度　用光电探测器测量一定波长范围内的总辐射通量时，单位辐射通量引起光电探测器的反应称为积分灵敏度. 常以每流明的微安数或每瓦的安培数来评价.

响应时间　光电探测器从开始接受光照到获得稳定的信号输出，常需要一定的时间，称为光电探测器的响应时间.

线性响应　如果光电探测器产生的光电流与照射在它上面的光通量(或光照度)成正比关系，则称为光电探测器的线性响应.

使用光电探测器应注意：

(1) 光电探测器应存放在暗处，避免强光照射，以免出现灵敏度下降的"疲劳"现象. 一旦出现"疲劳"现象，应立即停止使用，并存放暗处，则可全部或部分恢复.

(2) 使用中应注意减小非信号光产生的本底电流(包括热激发产生的"暗电流"以及环境杂散光产生的光电流)的影响，并在测量值中扣除.

(3) 光电探测器的外接电路的电阻要小，以便于探测器保持良好的线性响应. 如直接用电流计显示光电流，则电流计应选择低内阻型，或使用补偿式测量电路. 具体的线性范围应由实测确定.

(4) 如果待测光讯号是脉冲光讯号时，应选择响应时间短于脉冲光的变化周期的光电探测器，才能反映出待测光源的脉冲特性.

(5) 任何光电探测器初次投入使用前，必须经过光照老化，待性能稳定后，才能进行精确的测量工作.

2. 几种常用的光电探测器

(1) 光电管

光电发射二极管简称光电管，它有一个阴极和一个阳极，装在一个抽成真空或充有惰性气体的玻璃管内，阴极涂有适当的光电发射材料，称为光阴极，当满足一定条件的光照射光阴极后，就会从光阴极表面发射出电子，如在二极间加上电压，则将在回路中产生光电流，如图 0－2－5 所示，图中(a)为不透明光阴极，(b)为半透明光阴极光电管.

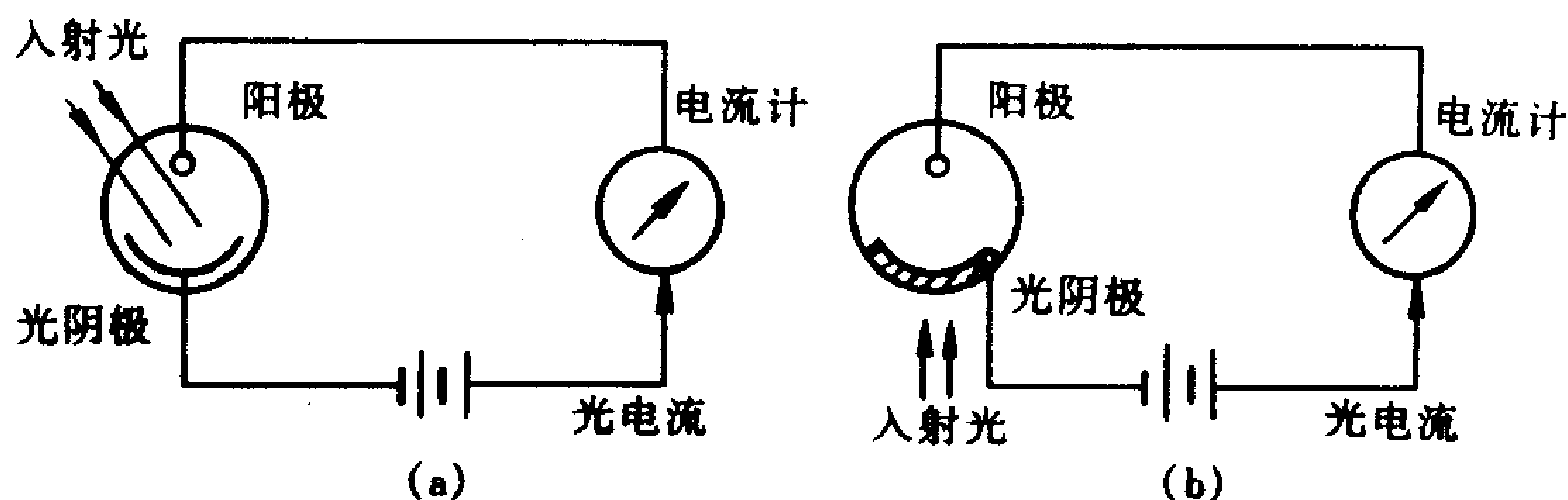


图 0－2－5

产生光电效应的入射光波长必须满足 $h\nu > W$ 的关系. 其中 h 为普朗克常量，ν 为入射光频率($\nu = c/\lambda$)，W 为光阴极表面的电子逸出功，而与 $h\nu = W$ 相应的波长

$$\lambda_c = hc/W \qquad (0-2-1)$$

为光阴极的“红限”，现有光阴极材料的电子逸出功都在 1 eV 以上，相应的光阴极的红限在 1 200 nm 以下.

对于真空光电管来说，光阴极发射的光电子数，在很宽的光通量范围内与光通量成正比，即线性范围较宽，因此真空光电管可用于精密测量工作. 当光通量不变时，光电流随外加电压的增加而

增加，最后达到饱和，这时由于光照所产生的光电子几乎都到达了阳极．典型的光电流与外加电压的关系，即光电管的伏安特性如图 0－2－6 所示，真空光电管的响应时间极短，一般在 10^{-8}s 以下．因此可用于测量快速变化的脉冲光．表 0－2－1 列出一些国产真空光电管的特性．

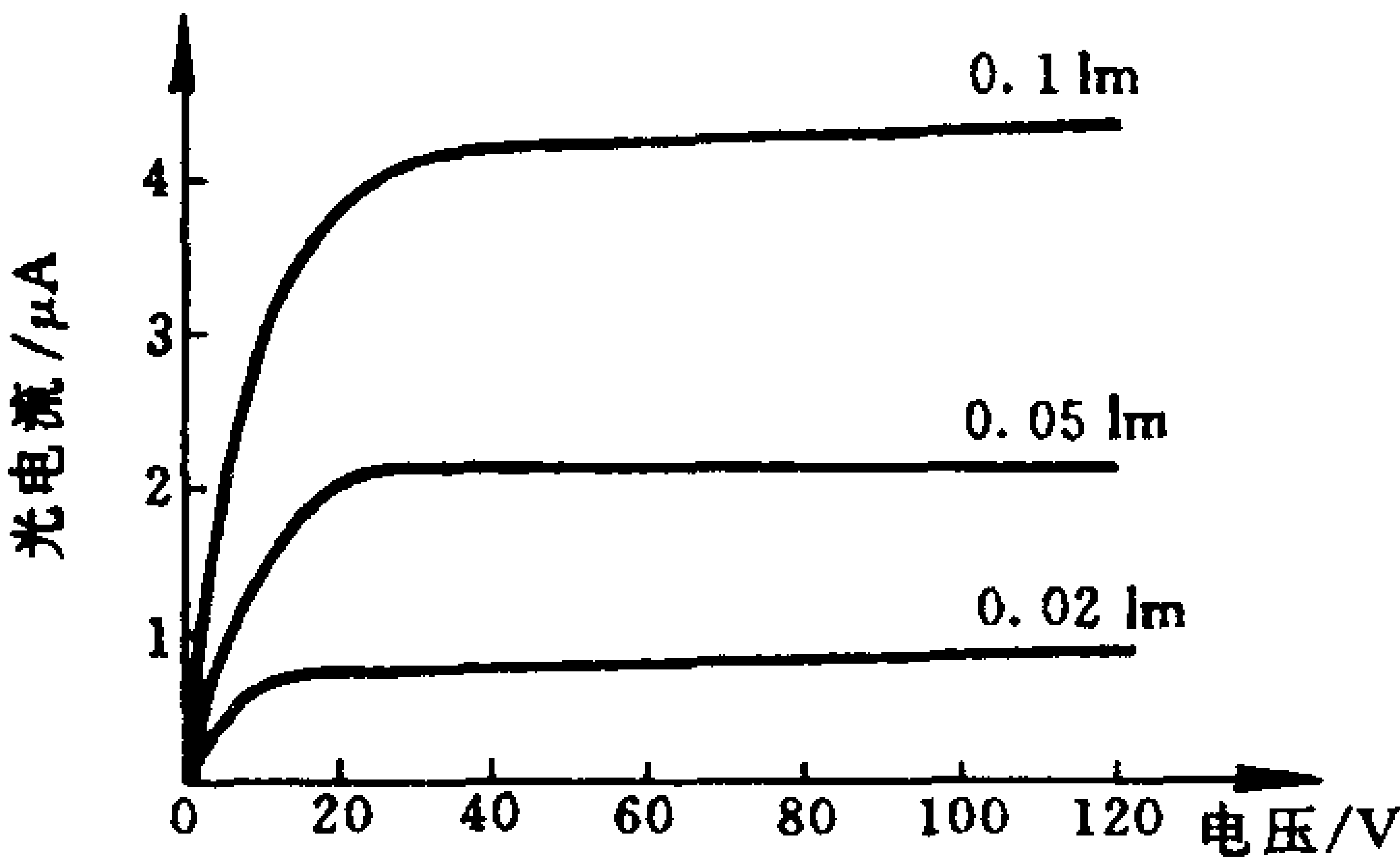


图 0－2－6

表 0－2－1　国产真空光电管特性

型　　号	GD－2A	GD－5	GD－6	GD－7
光阴极材料	Cs_3Sb	Cs_3Sb	AgOCs	$KNa_2Sb(Cs)$
光谱灵敏度范围/nm	400～600	185～600	600～1200	350～850
灵敏度峰值波长/nm	450±50	400±20	800±100	450±20
额定工作电压/V	150	30	30	100
最高工作电压/V	300	100	100	≤200
额定电压下灵敏度 ($\mu A \cdot lm^{-1}$)	≥4.5	≥30	≥10	≥45
暗　电　流/A	1×10^{-8}	$\leq3\times10^{-11}$	$\leq8\times10^{-11}$	$\leq8\times10^{-10}$

真空光电管的灵敏度比较低，因此在某些光电管中充有一定量的惰性气体，称为充气光电管，管内产生的光电子被外加电压所产生的电场加速后，会使惰性气体电离，这样就增加了光电流，也就提高了灵敏度，充气光电管的灵敏度可达 150 μA/1m 左右．但是，充气光电管和真空光电管相比，响应时间比较长，线性响应范

围也比较小.

(2) 光导管(光敏电阻)

当硫化镉、硒化镉等光导管受到光照后,并没有光电子发射,但光导管中半导体内电子的能量状态发生变化,致使电导率增加(即电阻变小). 照射的光通量越大,它的电阻变得越小. 因而可以利用光导管受光照后电阻的变化来测量入射辐射通量的大小,光导管电路如图 0-2-7 所示.

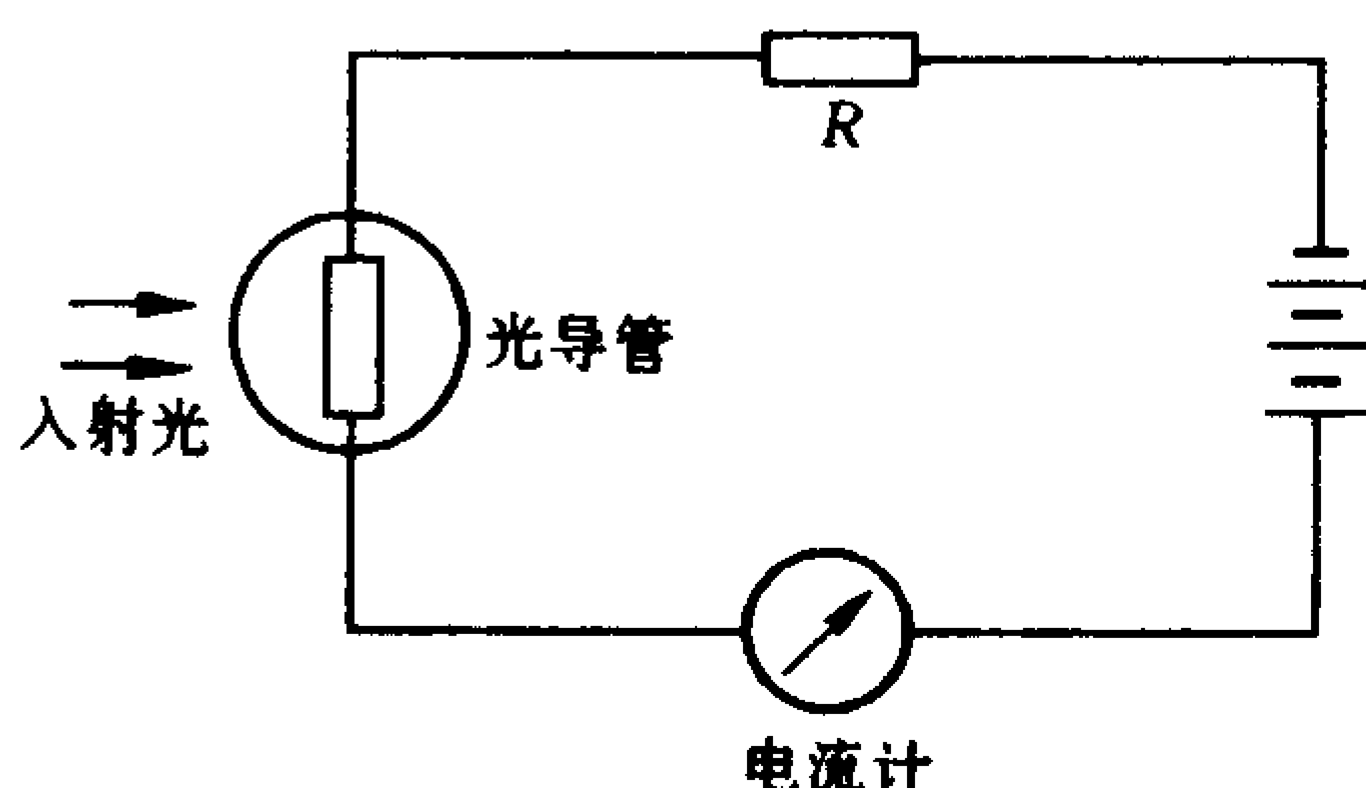


图 0-2-7

光导管产生的光电流 I 不仅与入射光通量 F 有关,而且与工作电压 V 有关. 电压越高,光电流也越大,但电压不能太高,每种光导管都有规定的最高允许电压,一般在几十伏到几百伏之间,在这一电压范围内,当光通量 F 一定时,光电流 I 与电压 V 成正比. 典型的光导管的特性曲线如图 0-2-8 所示.

一般光导管的响应时间在 $10^{-1} \sim 10^{-8}$s 之间,其灵敏度与响应时间成正比.

光导管的光谱灵敏度分布与材料有关,在可见光区和近红外光区工作的硫化镉光导管的光谱灵敏度峰值波长在 510 nm 左右,硒化镉光导管在 720 nm 左右. 表 0-2-2 列出一些硫化镉光导管的特性. 测量近红外光时,常用硫化铅、锑化铟等光导管及锗、硅光敏二极管.

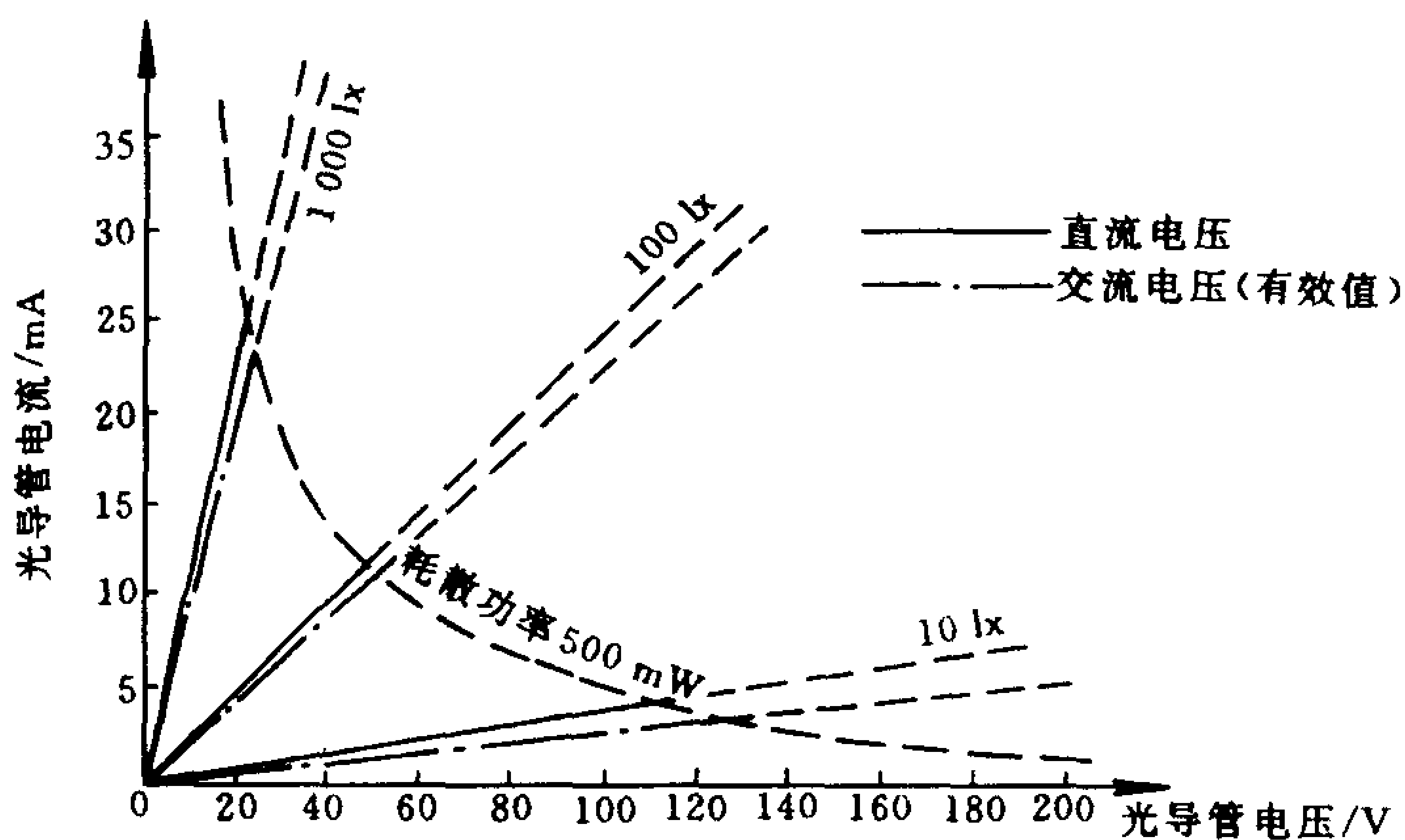


图 0－2－8

表 0－2－2　RG－GdS 型硫化镉光导管规格

型　号	光电阻 Ω	暗电阻 Ω	光谱峰值波长 nm	时间常数 ms	耗散功率 mW	极限电压 V	光敏面 mm^2
RG－CdS A	$\leqslant 5\times10^4$	$\geqslant 1\times10^8$				≤100	
RG－CdS B	$\leqslant 1\times10^5$	$\geqslant 1\times10^8$	520	<50	<100	≤150	1～2
RG－CdS C	$\leqslant 5\times10^5$	$\geqslant 1\times10^9$				≤150	

(3) 光电池

它是利用光生伏打效应设计的一种半导体光电探测器. 光电池的特点是不需要外加电源,而光电管或光导管都需要一个稳定的电源才能工作. 常用的光电池有硒光电池和硅光电池,前者的光谱灵敏度峰值为570 nm(在黄光区),后者为 780 nm (在近红外区),国产的几种光电池的规格见表 0－2－3,其相对灵敏度曲线如图 0－2－9 所示.

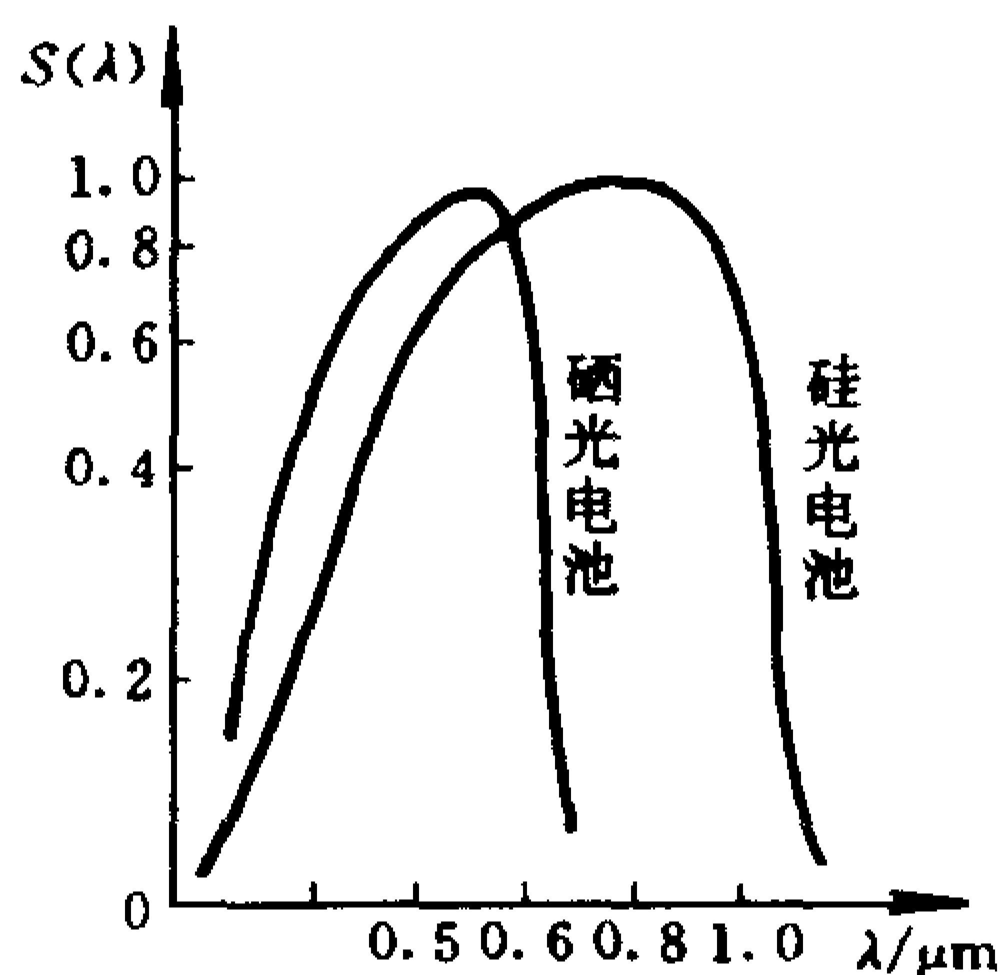


图 0－2－9

表 0－2－3　光电池的基本参数

名　称	硒光电池		硅光电池		
光谱响应范围/μm	可见光区		0.5～1.0		
灵敏波长/μm	0.56		0.80		
积分灵敏度	250～500μA/lm		0.2～0.5A/W		
内阻/Ω	$10^3\sim5\times10^4$	$500\sim4\times10^3$			
接收面积	$\phi=25$mm	$\phi=45$mm	5×5mm^2	10×20mm^2	20×20mm^2

光电池的响应时间一般在 $10^{-3}\sim10^{-8}$s，不同材料的响应时间差别很大．由于硒光电池的光谱响应特性和人眼非常接近，因此是目前用得最多的一种光电探测器．硒光电池的结构如图 0－2－10所示．半导体硒受光照时，硒中形成电子－空穴对，电子被

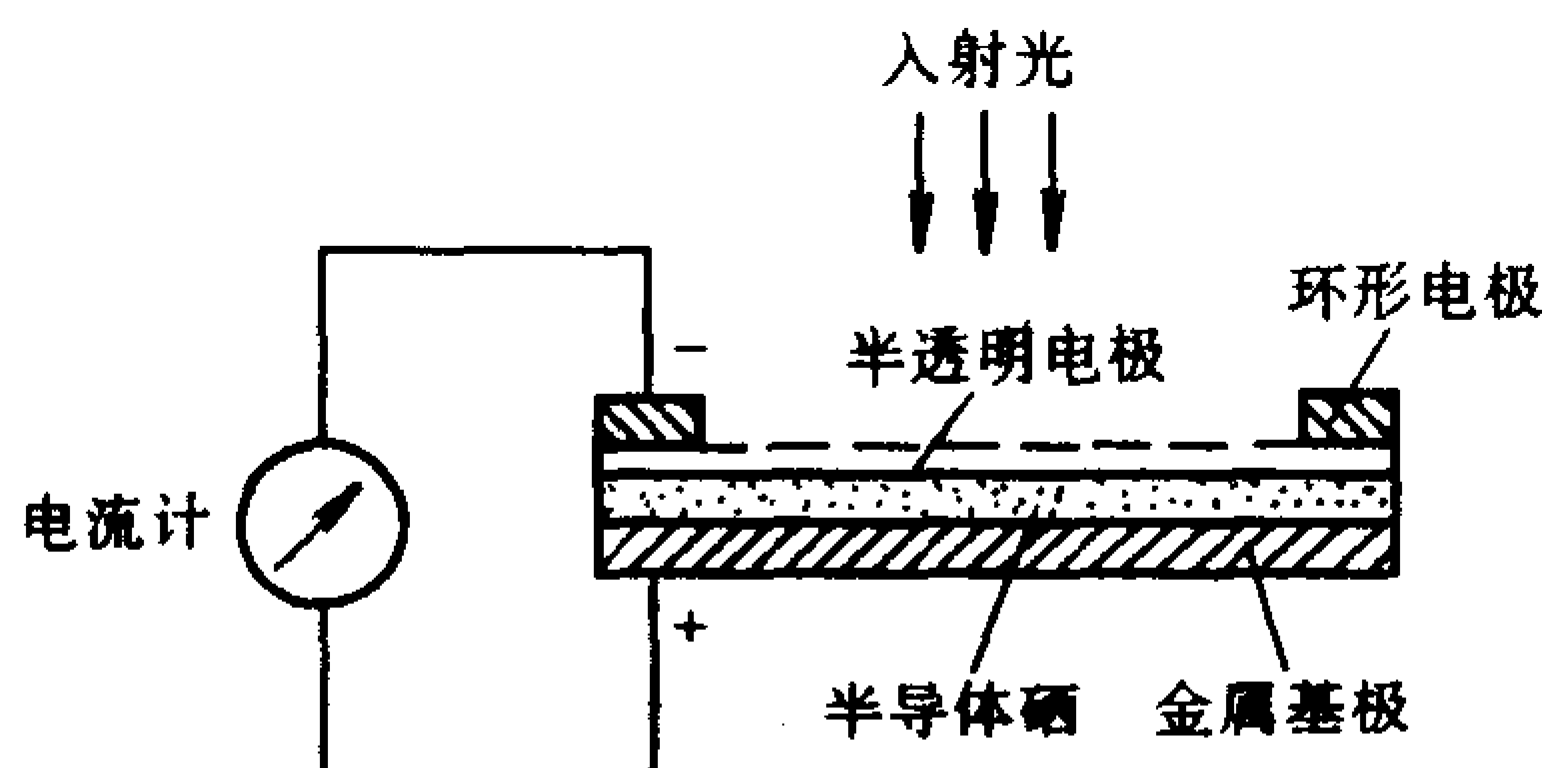


图 0－2－10

结电压吸入半透明金属膜，因而结电压降低，金属膜变成负电势，金属基极对透明金属膜层为正电势，这个电势差值与入射光通量有关．如果用导线接入电流计，就会产生光电流．入射光越强，光电流也越大，在较宽的范围内，硒光电池产生的光电流与入射光通量能保持线性响应．

硒光电池的等效电路如图 0－2－11 所示．它与电池一样有一个内阻 R'，同时还相当于一个平板电容 C，C 与 R' 并联，图中 R 表示硒光电池的负载电阻，当入射光通量 Φ 照射到硒表面时，产生光电流为 i，其中一部分 i_1 流过 R'，另一部分 i_2 流过 R，则

$$i = i_1 + i_2$$

而在外电路中测量到的光电流是 i_2，因光电池的积分灵敏度为

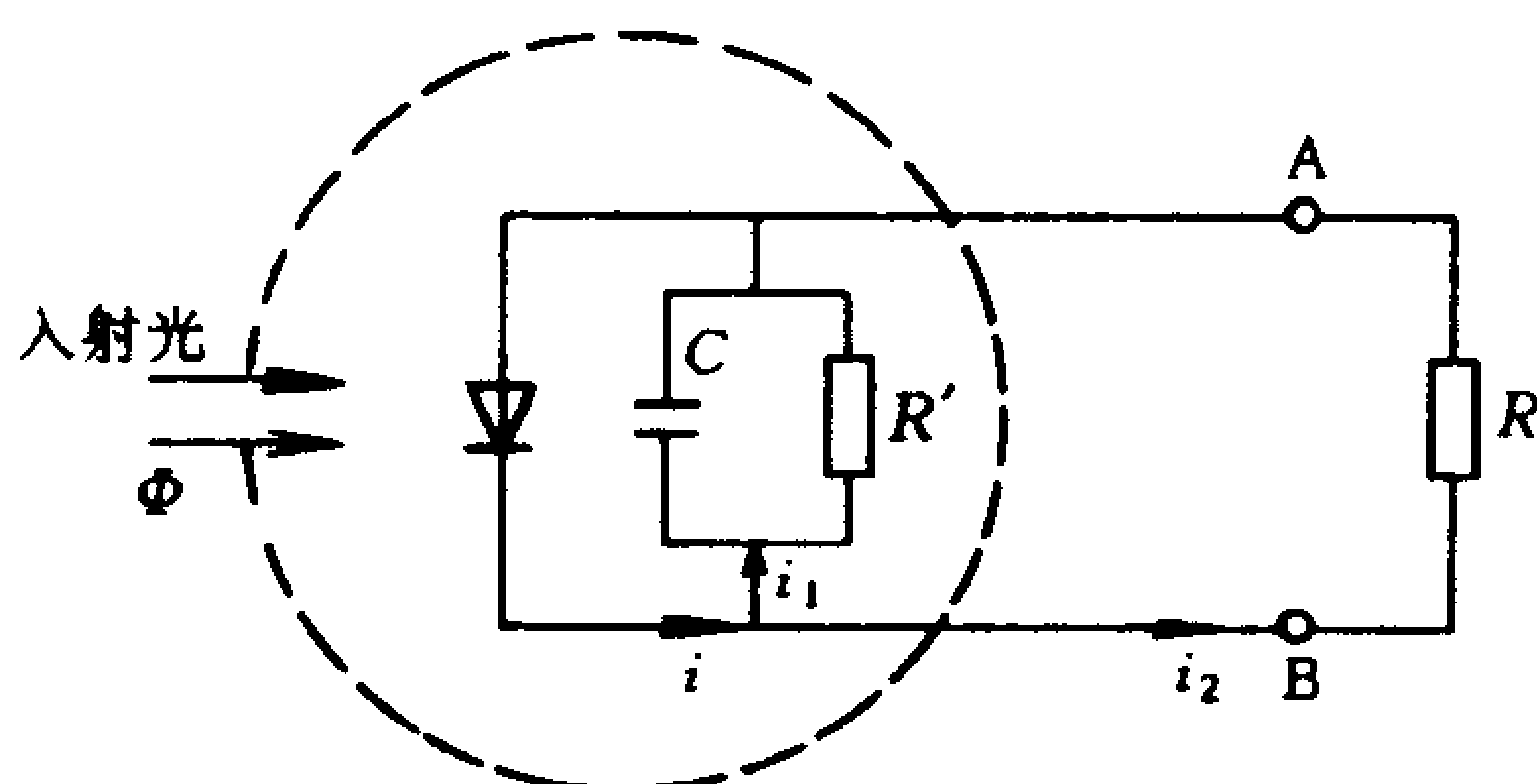


图 0-2-11

$$S = i/\Phi \qquad (0-2-2)$$

因此,可计算得

$$i_2 = S\Phi R'/(R' + R) \qquad (0-2-3)$$

由于半导体的特性,硒光电池的内阻 R' 随入射光通量 Φ(或光照度 E)而变,Φ 增大时,R' 减小(一般 R' 的数值在几千到几十万欧姆范围内). 由式(0-2-3)可见,当 R 较大时,因 Φ 不同而引起的 R' 的变化对 i_2 的影响较大,因此,i_2 与 Φ(或 E)就没有线性关系. 而当 R 较小时,R' 的变化对 i_2 影响较小,i_2 与 Φ(或 E)接近线性关系. 因此,在实际使用中,要选用低内阻的电流计作测量仪表,或用补偿平衡线路(参见实验十二).

§3 光学实验常用仪器的结构与调节

在光学实验中,常使用的一些基本光学仪器有光具座、测微目镜、移测显微镜、望远镜、分光计等. 本节将对几种基本的光学仪器及其特性作一介绍.

§3-1 光 具 座

光具座结构的主体是一个平直的导轨,有简易的双杆式和通

用的平直导轨式两种. 导轨的长度为 1～2 m,上面刻有毫米标尺. 另外还有多个可以在导轨面上移动的滑块支架.

一台性能良好的光具座应该是导轨的长度较长,平直度较好;还要保持光具座上各组件的同轴性和滑块支架的平稳性.

图 0－3－1 示出 GP－78 型光具座的结构示意图,它是目前光学实验中比较通用的一种光具座,长 1.5 m,精度较高.

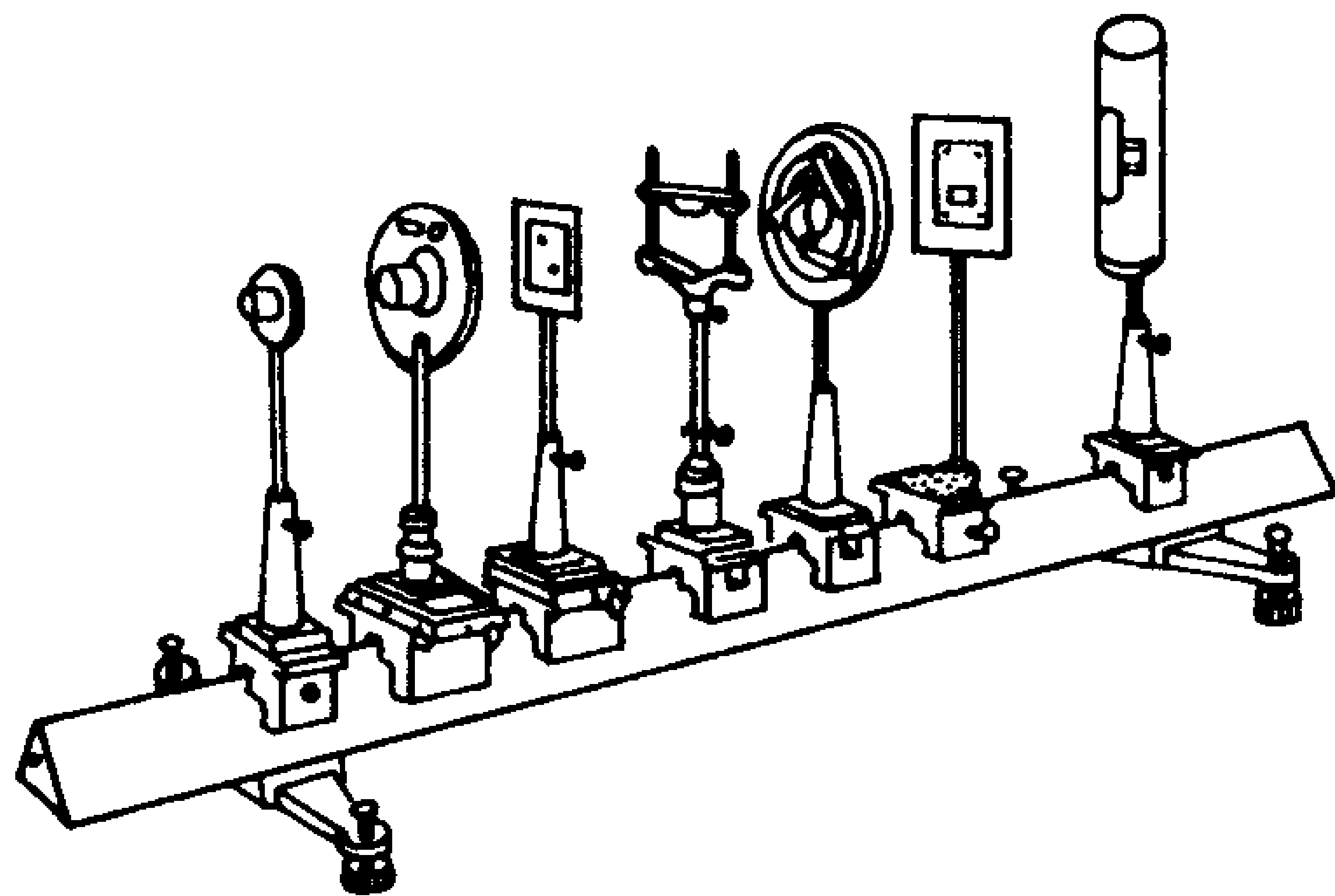


图 0－3－1

光具座上的共轴调节如下:

将各种光学元件(透镜、面镜等等)组合成特定的光学系统,运用这些光学系统成像时,要想获得优良的像,必须保持光束的同心结构,即要求该光学系统符合或接近理想光学系统的条件,这样,物方空间的任一物点,经过该系统成像时,在像方空间必有唯一的共轭像点存在,而且符合各种理论计算公式. 为此,在光具座上调节光学系统,必须满足以下两点:

1. 共轴

调节光学系统中各种元件的光轴,使之共轴. 并让物体发出的成像光束满足近轴光线的要求.

2. 等高

因为成像公式中的各段距离,都是指光学系统光轴上的距离,所以要从光具座导轨的刻度尺上的读数求出符合实际的距离,必须做到光学系统的光轴和光具座导轨的基线平行——简称等高.

调节光学系统各元件的共轴等高，是光学实验中的一项基本要求，必须很好掌握，一般的调节可分粗调和细调两步进行.

(1) 粗调

先把物、透镜、像屏等元件放置于光具座上，如图 0－3－2 用 T 形辅助棒依次检查并调整物、透镜及屏的中心(图中物体 P 经透镜 L 成像于 P')，使各元件的中心大致在与导轨平行的同一条直线上，并使物平面、像屏平面和透镜面相互平行且垂直于光具座导轨.

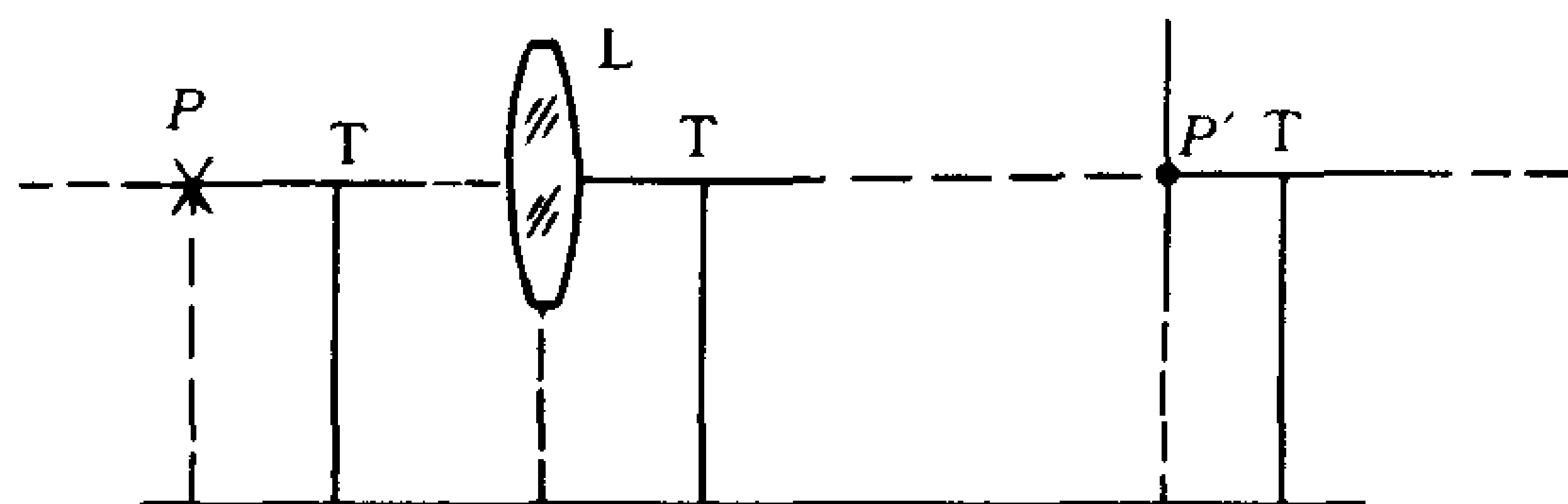


图 0－3－2

(2) 细调

依靠成像规律进行调节. 例如在透镜焦距测定实验中，若物和观察光屏相距较远，则移动透镜时会有两个不同的位置 Ⅰ 和 Ⅱ，于屏上分别呈现大、小两个实像. 若物的中心处在透镜光轴上而且光轴与导轨基线平行，则移动透镜时，大小两次成像的中心必将重合. 若物的中心偏离光轴或导轨与光轴不平行，则当透镜移动时，两次成像时像的中心不再重合. 这时可根据像中心的偏移判断，调节至共轴等高状态. 如图 0－3－3 所示，物体 P 的中心偏离在透镜光轴之下，则大小两像 P'、P'' 的中心均偏离光轴，分别位于光轴上方的 P' 和 P'' 处，小像中心 P'' 离轴较近.

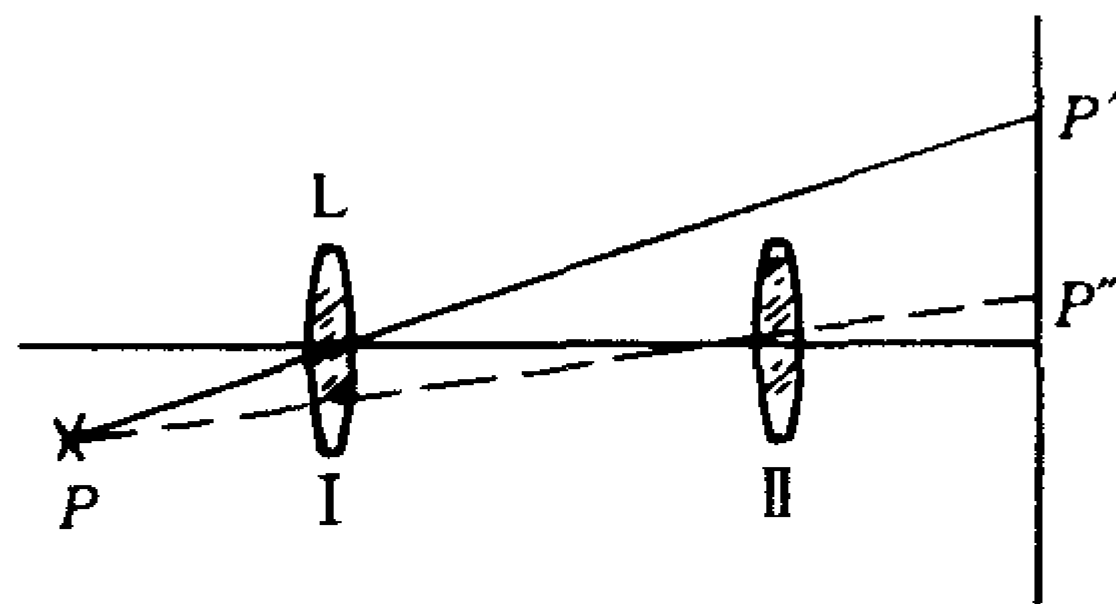


图 0－3－3

一般调节的方法是成小像时,调节光屏位置,使 P'' 与屏中心重合;而在成大像时,则调节透镜的高低或左右,使 P' 位于光屏中心.依次反复调节,便可调好.

§3-2 测微目镜

测微目镜一般作为光学精密计量仪器的附件使用,在移测显微镜、调焦望远镜、各种测长仪、测微准直管上都可装用.测微目镜也可以单独使用,主要用来测量由光学系统所成实像的大小.它的特点是测量范围较小,但准确度较高.

下面以实验室常用的 MCU-15 型测微目镜为例,说明它的结构、原理和使用方法.MCU-15 型测微目镜系由目镜光具组、分划板、读数鼓轮和接头装置组合而成.其规格如下:

目镜放大率	15 倍
有效测量范围	6 mm
目镜分划尺分度值	1 mm
分划尺刻度数	0~8 mm
测微鼓轮分度值	0.01 mm
测量精度	0.01 mm

MCU-15 型测微目镜的外型和结构如图 0-3-4 和 0-3-5 所示.(1) 是无畸变型复合目镜;(2)是有毫米刻度的固定玻璃板(分划尺);(3)是刻有十字叉丝的分度板;(4)是传动测微螺旋;

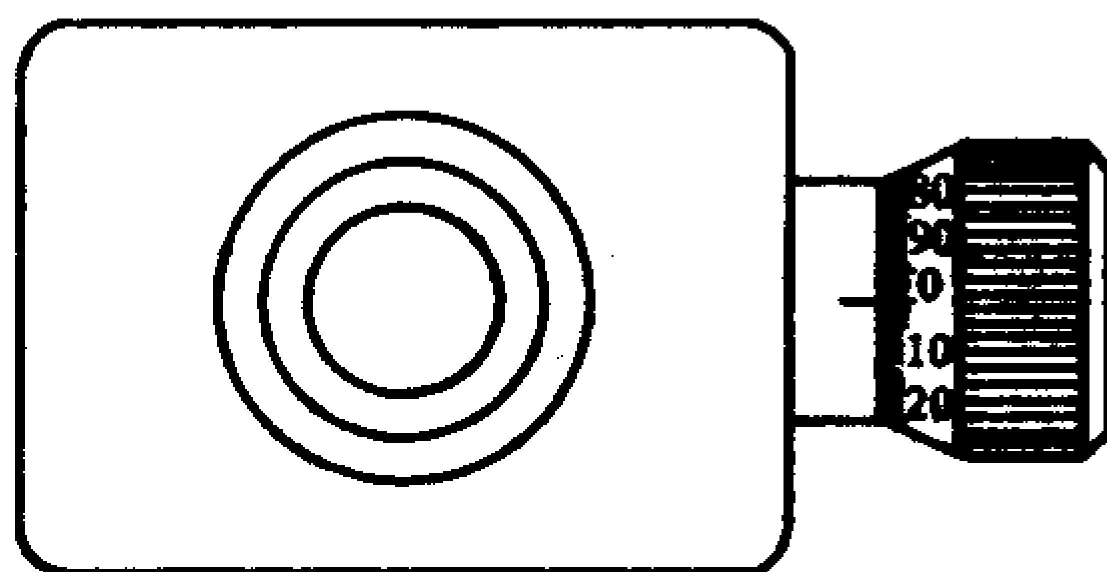


图 0-3-4

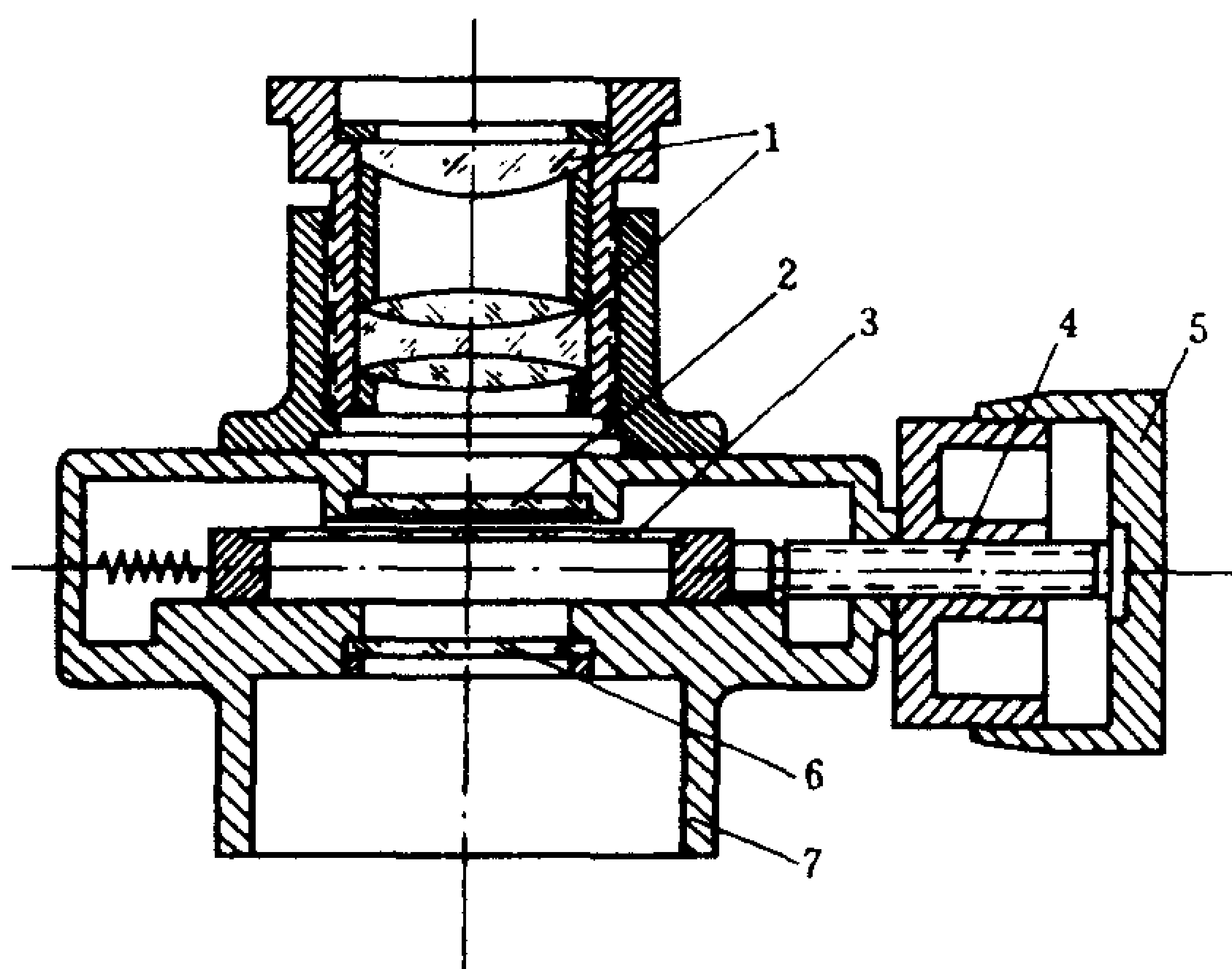


图 0-3-5

(5)是读数鼓轮;(6)是防尘玻璃;(7)是接头装置,可装配在各种显微镜上和准直管上(或其它类似仪器上)使用.

打开目镜本体匣,可以看到测微目镜的内部结构(图 0-3-6),毫米刻度的分划尺〔图 0-3-7(a)〕固定在目镜的物方焦面上,在分划板上刻有竖直双线和十字叉丝〔图 0-3-7(b)〕,分划尺和分划板之间仅有 0.1 mm 的空隙,因此,若在目镜中观察就看到如图0-3-7(c)所示的图案.分划板的框架(1)通过弹簧(4)与

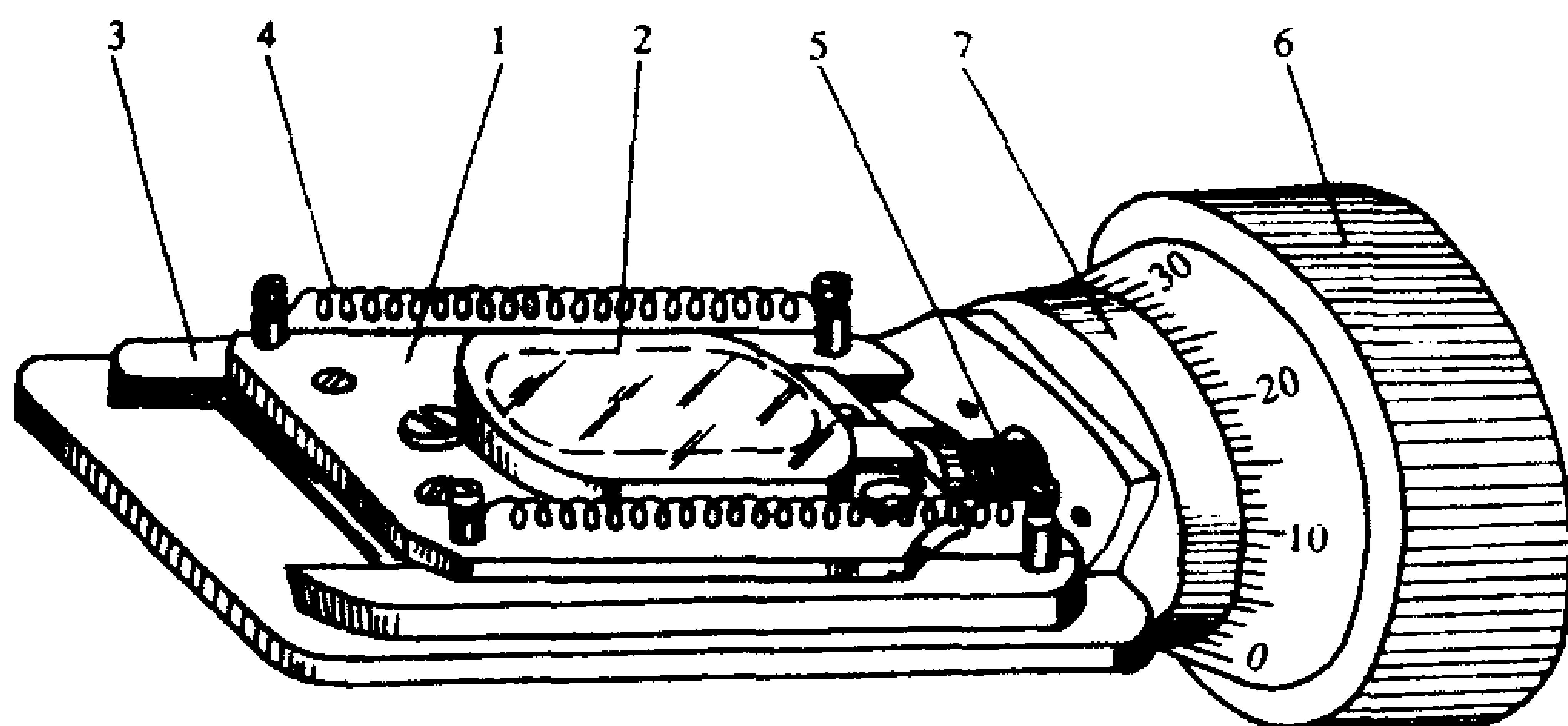


图 0-3-6

1. 分划板框架;2. 分划板;3. 导轨;4. 弹簧;5. 丝杆;6. 读数鼓轮;7. 不动轮

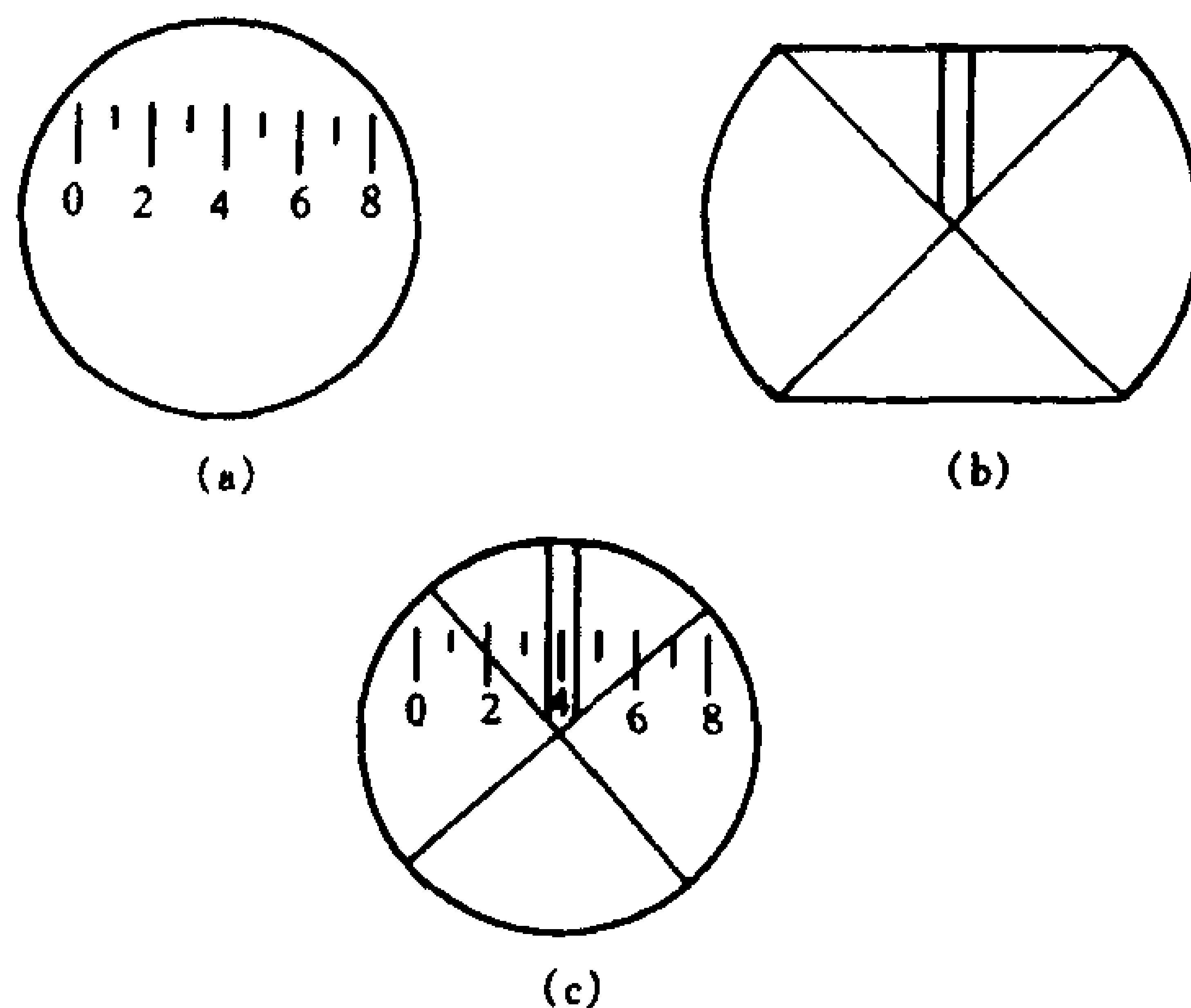


图0-3-7

测微螺旋的丝杆(5)相连,当测微螺旋(与读数鼓轮相连接)(6)转动时,丝杆就推动分划板的框架在导轨(3)内移动,这时目镜中的竖直双线和十字叉丝将沿垂直于目镜光轴的平面横向移动. 读数鼓轮每转动一圈,竖线和十字叉丝就移动1 mm;由于鼓轮上的周边又细分成100小格,因此,鼓轮每转过1小格,叉丝就移动0.01 mm. 测微目镜十字叉丝中心移动的距离,可从分划尺上的数值加上读数鼓轮上的读数而得到.

使用测微目镜时应注意以下各点:

1. 读数鼓轮每旋转一周,叉丝移动距离等于螺距,由于测微目镜的种类繁多,精度不一,因此使用时,首先要确定分度值.

2. 使用时先调节目镜,使测量准线(叉丝)在视场中清晰可见,再调节物像,使之与测量准线无视差地对准后,方可进行测量. 测量时,必须使测量准线的移动方向和被测量的两点之间连线的方向相平行,否则实测值将不等于待测值.

3. 由于分划板的移动是靠测微螺旋丝杆的推动,但螺旋和螺套之间不可能完全密合,存有间隙. 如果螺旋转动方向发生改变,则必须转过这个间隙后,叉丝才能重新跟着螺旋移动. 因此,当测微目镜沿相反方向对准同一测量目标时,两次读数将不同,由此而

产生测量的回程误差. 为了防止回程误差,每次测量时,螺旋应沿同一方向旋转,不要中途反向,若旋过了头,必须退回一圈,再从原方向旋转推进、对准目标、进行重测.

4. 旋转测微螺旋时,动作要平稳、缓慢,如已到达一端,则不能再强行旋转,否则会损坏螺旋.

5. 如果测量平面和测微目镜支架的中心面不重合,其间距离在有关计算时,应作相应的修正.

§3－3　移测显微镜

移测显微镜是用于精确测量长度的专用显微镜,其型式比较多,物理实验室常用的 JXD－1 型移测显微镜,其规格如下:

总放大率	30 倍(物镜 3×,目镜 10×)
数值孔径	0.10
测量范围	0～50 mm
测微鼓轮分度值	0.01 mm

JXD－1 型移测显微镜的外型结构如图 0－3－8 所示,它是将低倍显微镜安装在精密的螺旋测量装置上,转动测微螺旋,显微镜筒能在垂直于光轴的方向上移动,移动的距离可从读数装置上读出. 目镜中装有十字分划板,用以对准测量的目标.

使用移测显微镜时,应注意:

1. 测量时应先调节目镜,使测量叉丝在视场中清晰可见;把被测目标放在毛玻璃(12)上,使被测物表面与镜筒(9)的光轴垂直并近似处在光轴上. 用手托住横轴(3),放松底座手轮(13),粗调工作距离,使物镜距被测物在 4 cm 以内,拧紧手轮(13)后,再用调焦手轮(2)由近向远进行微调,使清晰像与测量叉丝无视差地对准后,方可进行测量.

2. 测量时,必须使目镜的一根十字叉丝与显微镜的移动方向相垂直,移动显微镜,使这条叉丝逐次和被测物体(像)长度的两端点相重合,如果显微镜移动方向与该两点的连线方向相一致,并且

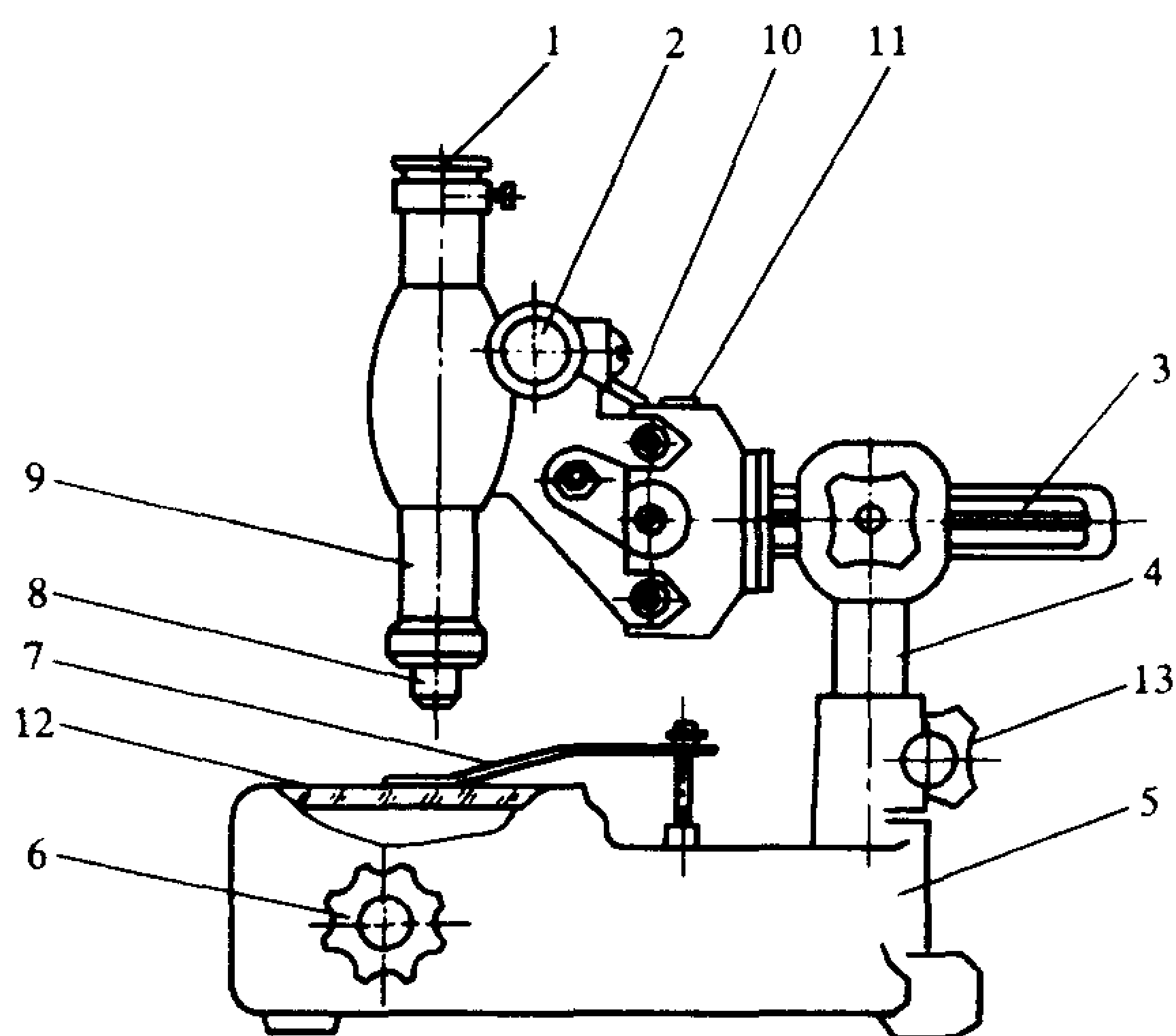


图0-3-8

1. 目镜; 2. 调焦手轮;3. 横轴;4. 立柱;5. 底座;6.反光镜调节手轮;7.工作台压簧;8.物镜;9.镜筒;10.指标;11.标尺;12. 毛玻璃;13.底座手轮

显微镜的光轴也垂直于该连线,那末,相应于两次位置的读数之差,就是物体上被测两点之间的距离. 否则,将使测得值不等于待测长度的真实值.

3. 由于显微镜的移动也是靠测微螺旋丝杆的推动,因此,移测显微镜和测微目镜一样,也要防止回程误差. 为了减少回程误差,要采用单方向测量.

4. 使用完毕后,应用保护套罩好仪器,以免灰尘进入丝杆部分. 各种光学零件切勿随意拆动,以保持仪器的精度.

§3-4 分 光 计

分光计是一种常用的光学仪器,实际上就是一种精密的测角

仪．在几何光学实验中，主要用来测定棱镜角、光束的偏向角等等，而在物理光学实验中，加上分光元件（棱镜、光栅）即可作为分光仪器，用来观察光谱，测量光谱线的波长等等．下面以学生型分光计（JJY 型）为例，说明它的结构原理和调节方法．

一、分光计的结构

分光计主要由底座、望远镜、准直管、载物平台和刻度圆盘等几部分组成，每部分均有特定的调节螺钉，图 0－3－9 为 JJY 型分光计的结构外型图．

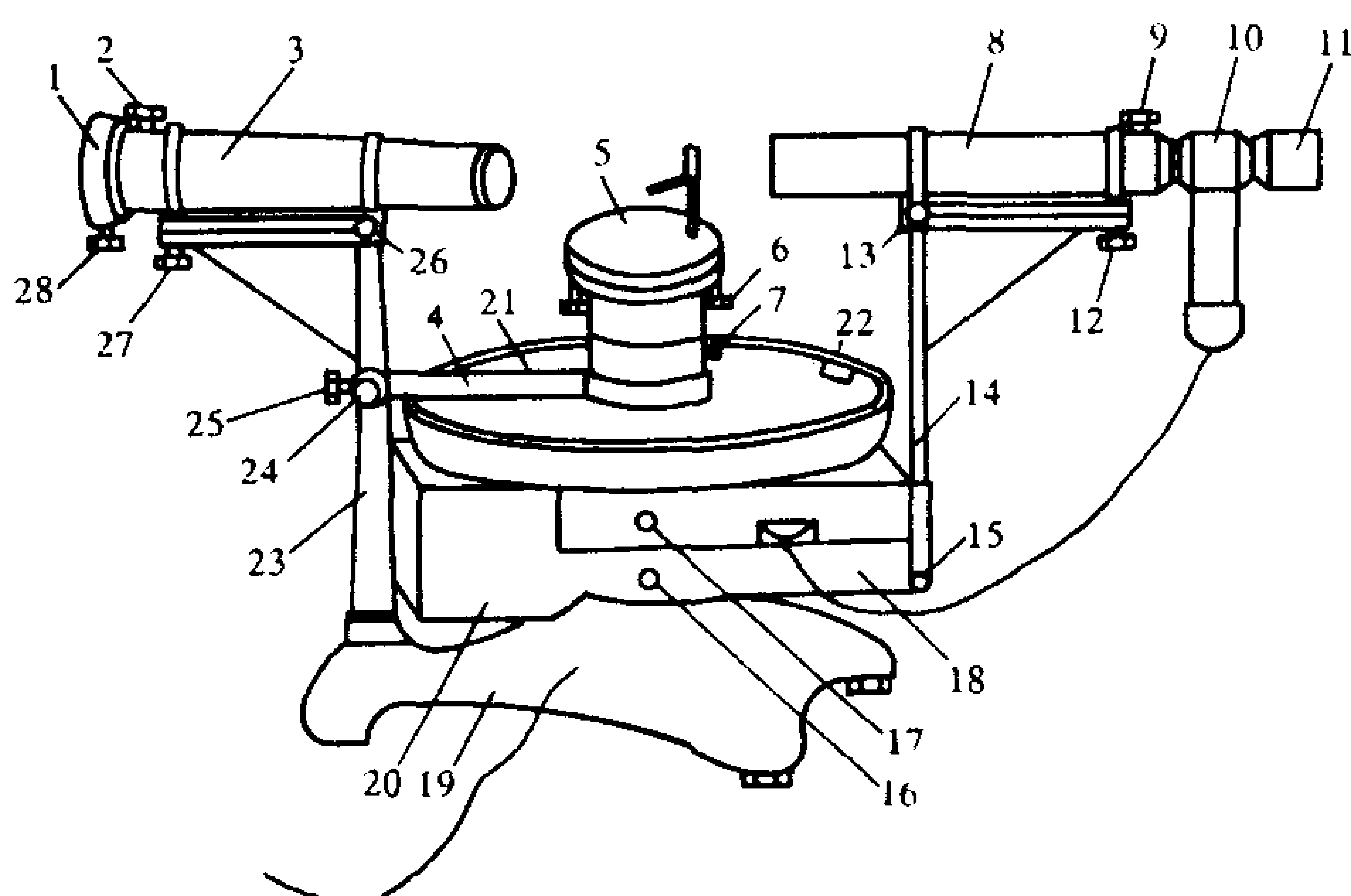


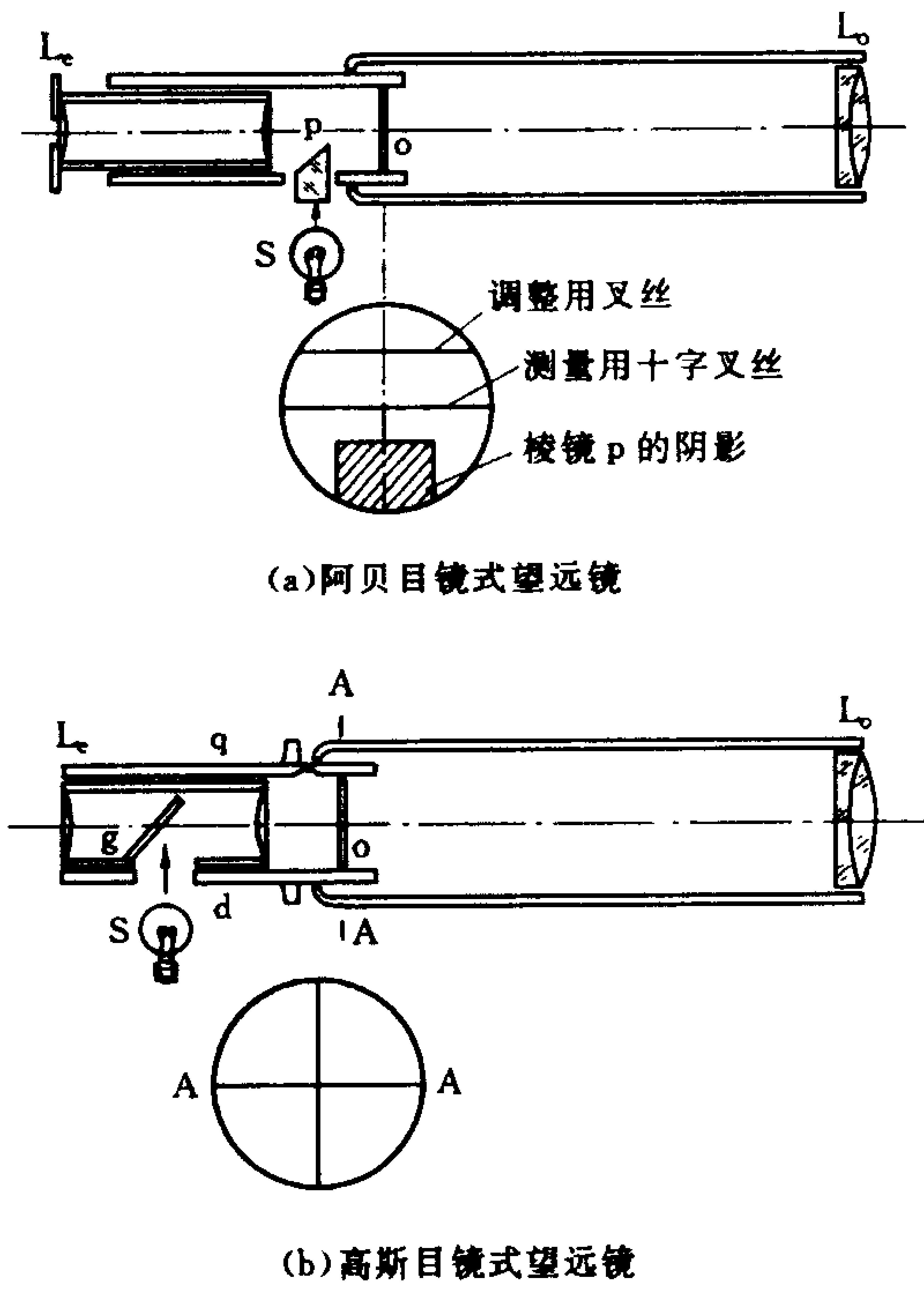
图 0－3－9

1．狭缝装置；2．狭缝装置锁紧螺丝；3．准直管；4．制动架（二）；5．载物台；6．载物台调平螺丝；7．载物台锁紧螺丝；8．望远镜；9．望远镜锁紧螺丝；10．阿贝式自准直目镜；11．目镜视度调节手轮；12．望远镜光轴高低调节螺丝；13．望远镜光轴水平调节螺丝；14．支臂；15．望远镜微调螺丝；16．望远镜止动螺丝；17．转轴与度盘止动螺丝；18．制动架（一）；19．底座；20．转座；21．度盘；22．游标盘；23．立柱；24．游标盘微调螺丝；25．游标盘止动螺丝；26．准直管光轴水平调节螺丝；27．准直管光轴高低调节螺丝；28．狭缝宽度调节手轮

1．分光计的底座要求平稳而坚实．在底座的中央固定着中心轴，刻度盘和游标内盘套在中心轴上，可以绕中心轴旋转．

2. 准直管固定在底座的立柱上，它是用来产生平行光的. 准直管的一端装有消色差物镜，另一端为装有狭缝的套管，狭缝的宽度可在 0.02～2 mm 范围内改变.

3. 望远镜安装在支臂上，支臂与转座固定在一起，套在主刻度盘上，它是用来观察目标和确定光线进行方向的. 物镜 L_o 和一般望远镜一样为消色差物镜，但目镜 L_e 的结构有些不同，常用的是阿贝式目镜(其结构和目镜中的视场如图 0－3－10(a)所示)和高斯目镜(其结构和目镜中的视场如图 0－3－10(b)所示).



(a)阿贝目镜式望远镜

(b)高斯目镜式望远镜

图 0－3－10

4. 分光计上控制望远镜和刻度盘转动的有三套机构，正确运

用它们对于测量很重要，它们是：

(1) 望远镜止动和微动控制机构，图 0－3－9 中的 16、15；

(2) 分光计游标盘止动和微动控制机构，图 0－3－9 中的 25、24；

(3) 望远镜和度盘的离合控制机构，图 0－3－9 中的 17.

转动望远镜或移动游标位置时，都要先松开相应的止动用螺钉；微调望远镜及游标位置时要先拧紧止动螺钉.

要改变度盘和望远镜的相对位置时，应先松开它们间的离合控制螺钉，调整后再拧紧. 一般是将度盘的 0°线置于望远镜下，可以减少在测角度时，0°线通过游标引起的计算上的不方便.

5. 载物平台是一个用以放置棱镜、光栅等光学元件的圆形平台，套在游标内盘上，可以绕通过平台中心的铅直轴转动和升降. 当平台和游标盘(刻度内盘)一起转动时，控制其转动的方式与望远镜一样，也是粗调和微调两种；平台下有三个调节螺钉，可以改变平台台面与铅直轴的倾斜度.

6. 望远镜和载物平台的相对方位可由刻度盘上的读数确定. 主刻度盘上有 0°～360°的圆刻度，分度值为 0.5°. 为了提高角度测量精密度，在内盘上相隔 180°处设有两个游标 $V_{左}$ 和 $V_{右}$，游标上有 30 个分格，它和主刻度盘上 29 个分格相当，因此分度值为 1′. 读数方法参照游标原理，如图 0－3－11 所示读数应为

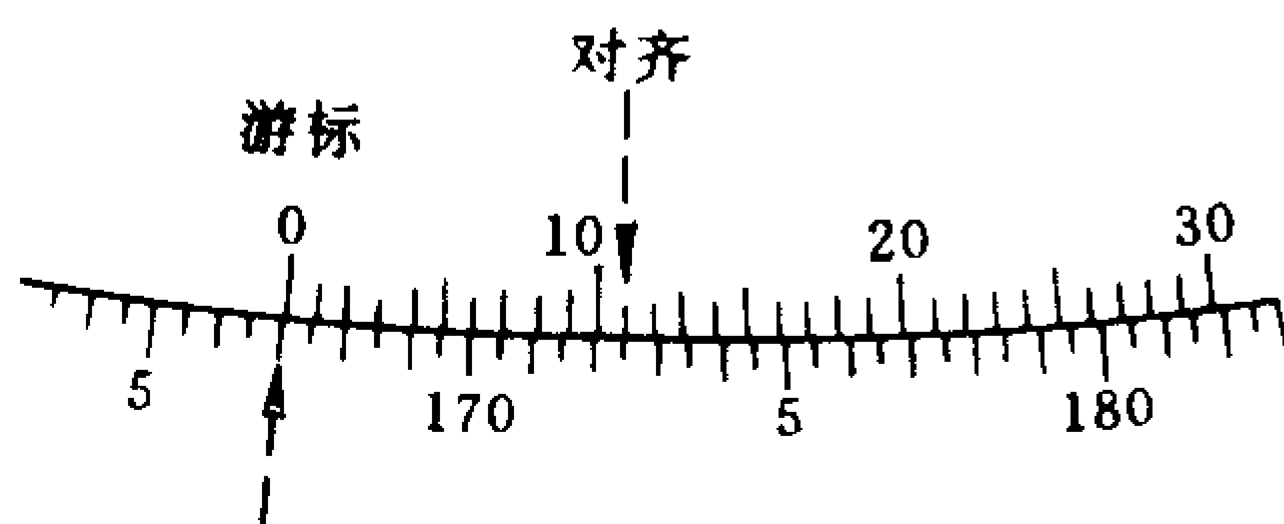


图 0－3－11

167°11′. 记录测量数据时，必须同时读取两个游标的读数(为了消除度盘的刻度中心和仪器转动轴之间的偏心差). 安置游标位置要考虑具体实验情况，主要注意读数方便，且尽可能在测量中刻度盘

0°线不通过游标.

记录与计算角度时,左、右游标分别进行,注意防止混淆算错角度.

二、分光计的调节

1. 调节要求

分光计是在平行光中观察有关现象和测量角度,因此要求:

(1) 分光计的光学系统(准直管和望远镜)要适应平行光.

(2) 从度盘上读出的角度要符合观测现象中的实际角度.

用分光计进行观测时,其观测系统基本上由下述三个平面构成(图 0-3-12).

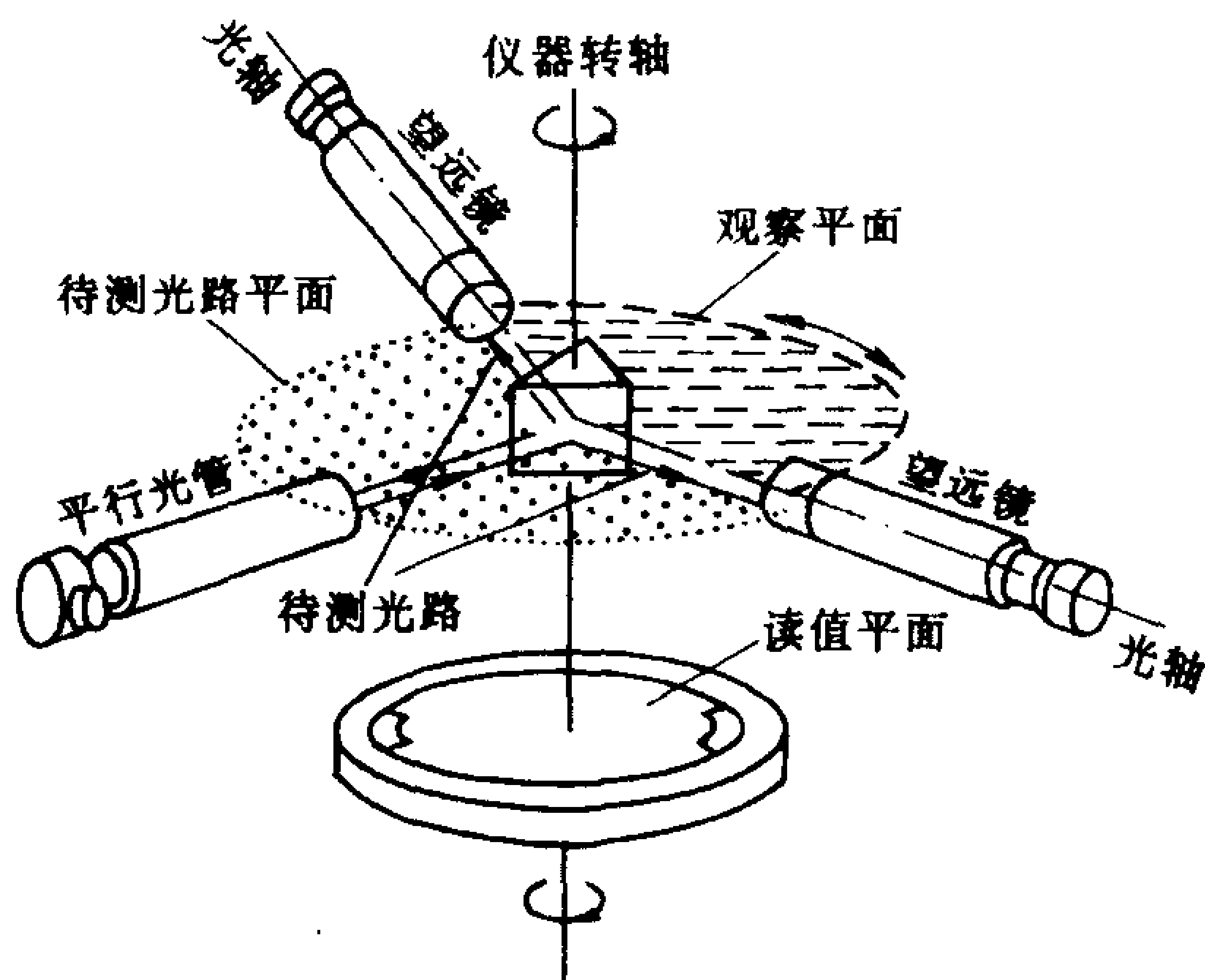


图 0-3-12

① 读值平面　这是读取数据的平面,由主刻度盘和游标内盘绕中心转轴旋转时形成的. 对每一具体的分光计,读值平面都是固定的,且和中心主轴垂直.

② 观察平面　由望远镜光轴绕仪器中心转轴旋转时所形成的. 只有当望远镜光轴与转轴垂直时,观察面才是一个平面,否

则,将形成一个以望远镜光轴为母线的圆锥面.

③ 待测光路平面　由准直管的光轴和经过待测光学元件(棱镜、光栅等)作用后,所反射、折射和衍射的光线所共同确定的. 调节载物平台下方的三个调节螺钉,可以将待测光路平面调节到所需的方位.

按调节要求,应将此三个平面调节成相互平行,否则,测得角度将与实际角度有些差异,即引入系统误差.

2. 调节方法(以下说明均按阿贝目镜进行,如果使用高斯目镜也可参照,因为原理是相同的)

(1) 粗调

① 旋转目镜手轮(即调节目镜与叉丝之间的距离),看清测量用十字叉丝(如图 0-3-10(a)).

② 用望远镜观察尽量远处的物体,前后调节目镜镜筒(即调节物镜与叉丝之间的距离),使远处物体的像和目镜中的十字叉丝同时清楚.

③ 将载物台平面和望远镜轴尽量调成水平(目测).

在分光计调节中,粗调很重要,如果粗调不认真,可能给细调造成困难.

(2) 细调

将分光计附件——平面反射镜(或三棱镜)如图 0-3-13 放在载物平台上(注意放置方位,如图放置则主要由一个螺钉控制一个反射面的倾斜).

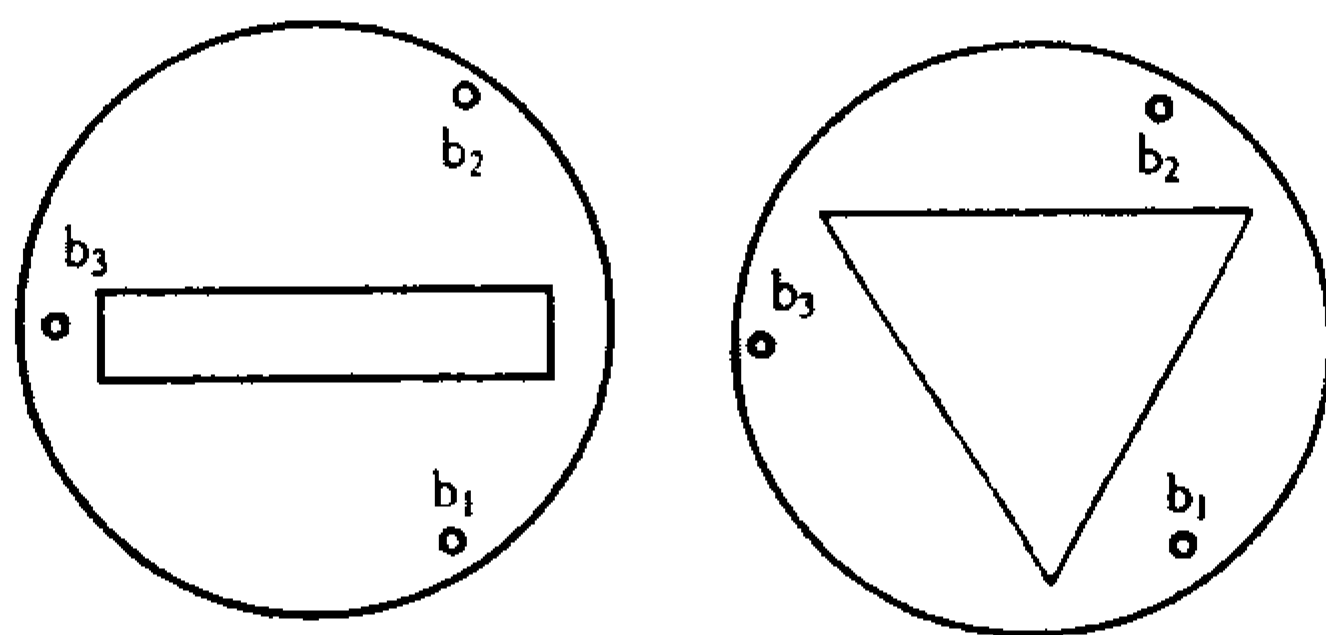


图 0-3-13

① 应用自准直原理调望远镜适合平行光.

点亮“小十字叉丝”照明用电灯；

将望远镜垂直对准平面镜(或三棱镜)的一个反射面，如果从望远镜中看不到绿色“小十字叉丝”的反射像，就要慢慢左右转动载物平台去找(粗调认真，均不难找到反射像)，如果仍然找不到反射像时，就要稍许调一下图 0－3－13 中的控制该反射面的螺钉 b_1，再慢慢左右转动平台去找；

看到“小十字叉丝”反射像(如图 0－3－14(a))后，再前后微调目镜镜筒，使小十字叉丝反射像清楚且和测量用十字叉丝间无视差. 这样，望远镜就已适合平行光，以后不许再改变望远镜的调焦状态.

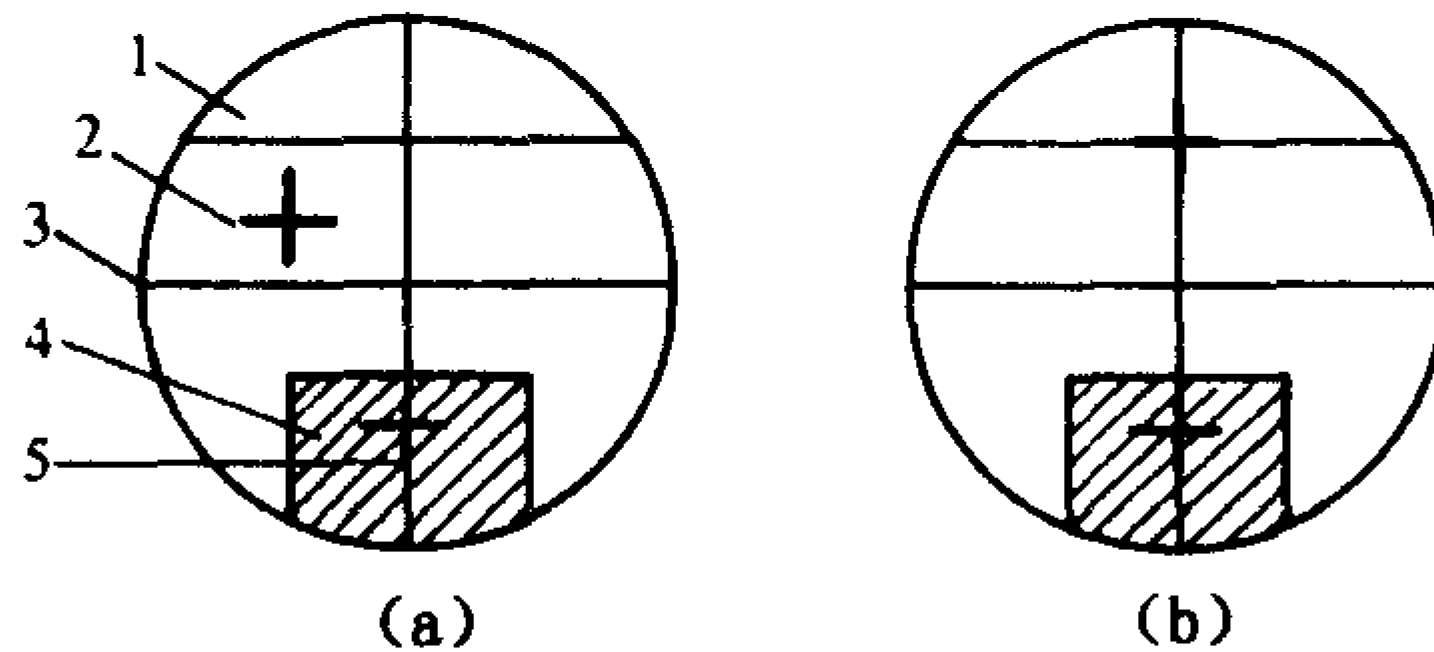


图 0－3－14

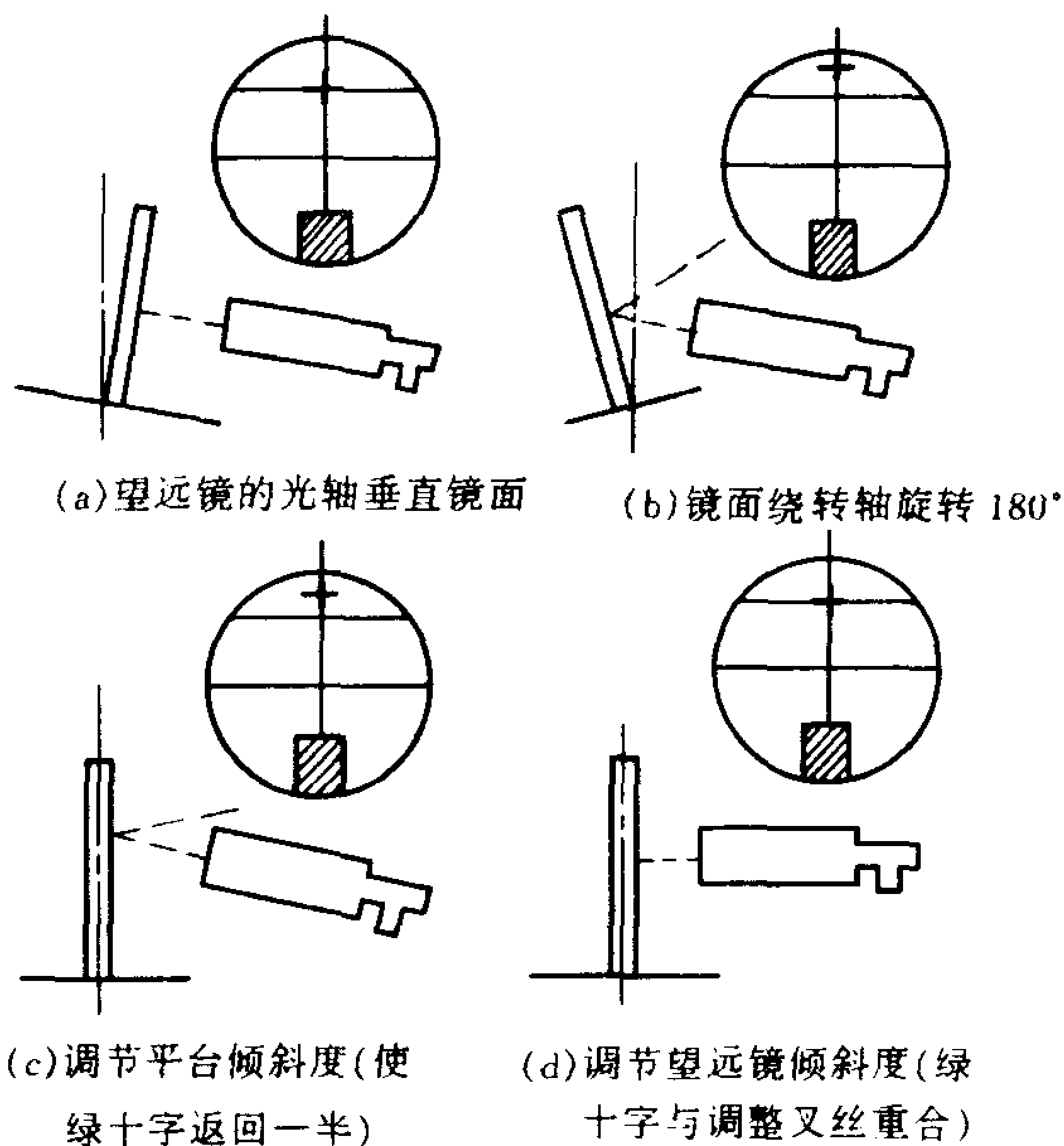
1. 调整用叉丝；2. 十字叉丝反射像；3. 测量用叉丝；
4. 棱镜 p 的阴影；5. 十字叉丝.

② 用逐次逼近法调望远镜光轴与中心转轴垂直(即将观察面调成平面，观察平面与读数平面平行).

由镜面反射的小十字叉丝像和调整叉丝如果不重合，调节望远镜倾斜使二叉丝间的偏离减少一半，再调节平台螺钉 b_1 使二者重合，如图 0－3－14(b)；

转载物平台，使另一镜面对准望远镜，左右慢慢转动平台，看到反射的小十字叉丝像，如果它和调整叉丝不重合，再同上由望远镜和螺钉 b_1 各调回一半(参照图 0－3－15).

注意：时常发现从平面镜的第一面见到了绿色小十字像，而在



(a)望远镜的光轴垂直镜面　(b)镜面绕转轴旋转 180°

(c)调节平台倾斜度(使绿十字返回一半)　(d)调节望远镜倾斜度(绿十字与调整叉丝重合)

图 0－3－15

第二面则找不到,这可能是粗调不细致,经第一面调节后,望远镜光轴和平台面均显著不水平,这时要重作粗调;如果望远镜轴及平台面无明显倾斜,这时往往是小十字像在调节叉丝上方视场之外,可适当调望远镜倾斜(使目镜一侧升高些)去找.

反复进行以上的调整,直至不论转到哪一反射面,小十字叉丝像均能和调整叉丝重合,则望远镜光轴与中心转轴已垂直. 此调节法称为逐次逼近法或各半调节法.(问:上述调节后,载物平台的台面与中心转轴是否已垂直?)

③ 调节准直管使其产生平行光,并使其光轴与望远镜的光轴重合.

关闭望远镜叉丝照明灯,用光源照亮准直管狭缝;

转动望远镜,对准准直管;

将狭缝宽度适当调窄，前后移动狭缝，使从望远镜看到清晰的狭缝像，并且狭缝像和测量叉丝之间无视差. 这时狭缝已位于准直管准直物镜的焦面上，即从准直管出射平行光束；

调准直管倾斜，使狭缝像的中心位于望远镜测量叉丝的交点上，这时准直管和望远镜的光轴平行，并近似重合.（问：为何讲近似重合，而不是完全重合？）

§4 光学仪器的正确使用与维护

一个实验工作者，在光学实验中，不但要爱护自己的眼睛，还要十分爱惜实验室的各种仪器. 实践经验证明，只有认真注意保养和正确地使用仪器，才能使测量得到符合实际的结果，同时这也是培养良好实验素质的重要方面. 由于光学仪器一般比较精密，光学元件表面加工（磨平、抛光）也比较精细，有的还镀有膜层，而且光学元件又大都是由透明、易碎的玻璃材料制成，因此使用时一定要十分小心，不能粗心大意. 如果使用和维护不当. 很容易造成以下不必要的损坏.

破损 如发生磕碰、跌落、震动或挤压等情况，均会造成光学元件的破损，以致光学元件的部分或全部无法使用.

磨损 往往是由于用手或其它粗糙的东西擦拭光学元件的表面，致使光学表面（光线经过的表面）留下擦不掉的划痕，结果严重地影响了光学仪器的透光能力和成像质量，甚至无法进行观察和测量.

污损 拿取光学元件不合规范，手上的油污、汗渍或其它不洁液体沉淀在元件的表面上，留下污迹斑痕，对于镀膜的表面，问题将更会严重. 若不及时进行清除，亦将降低光学仪器的透光性能和成像质量.

发霉生锈 大多由于保管不善，光学元件长期在空气潮湿、温度变化较大的环境下使用，因沾污霉菌所致；光学仪器的金属机械

部分也会产生锈斑,使光学仪器失去原来的光洁度,影响仪器的精度、寿命和美观.

腐蚀、脱胶　光学元件表面受到酸、碱等化学物品的作用时,会发生腐蚀现象;如有苯、乙醚等溶剂流到光学元件之间或光学元件与金属的胶合部分,就会发生脱胶现象.

使用和维护光学仪器的注意事项:

(1) 在使用仪器前必须认真阅读仪器使用说明书,详细了解所使用的光学仪器的结构、工作原理、使用方法和注意事项,切忌盲目动手,抱着试试看的侥幸心理.

(2) 使用和搬动光学仪器时,应轻拿轻放,谨慎小心,避免受震、碰撞,更要避免跌落地面. 光学元件使用完毕,不应随便乱放,要做到物归原处.

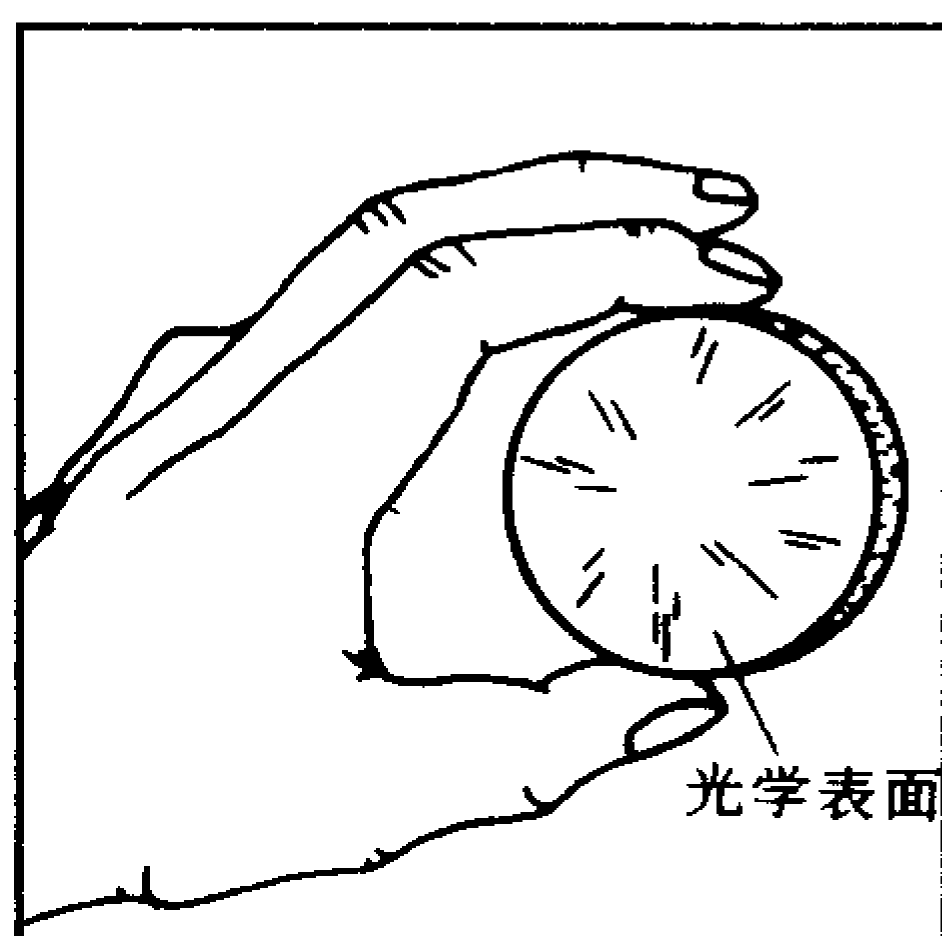
(3) 仪器应放在干燥、空气流通的实验室内,一般要求保持空气相对湿度为60%～70%,室温变化不能太快和太大. 也不应让含有酸性或碱性的气体侵入.

(4) 保护好光学元件的光学表面,绝对禁止用手触及,只能用手接触经过磨砂的"毛面",如透镜的侧边,棱镜的上下底面等,正确的方法如图0－4－1所示. 如发现光学表面有灰尘,可用毛笔、镜头纸轻轻擦去. 也可用清洁的空气球吹去. 如果光学表面有脏物或油污,则应向教师说明,不要私自处理. 对于没有镀膜的表面,可在教师的指导下,用干净的脱脂棉花蘸上清洁的溶剂如酒精、乙醚等,仔细地将污渍擦去. 但要注意,不要让溶剂流到元件胶合处,以免产生脱胶. 对于镀有膜层的光学元件,则应送实验室作专门技术处理.

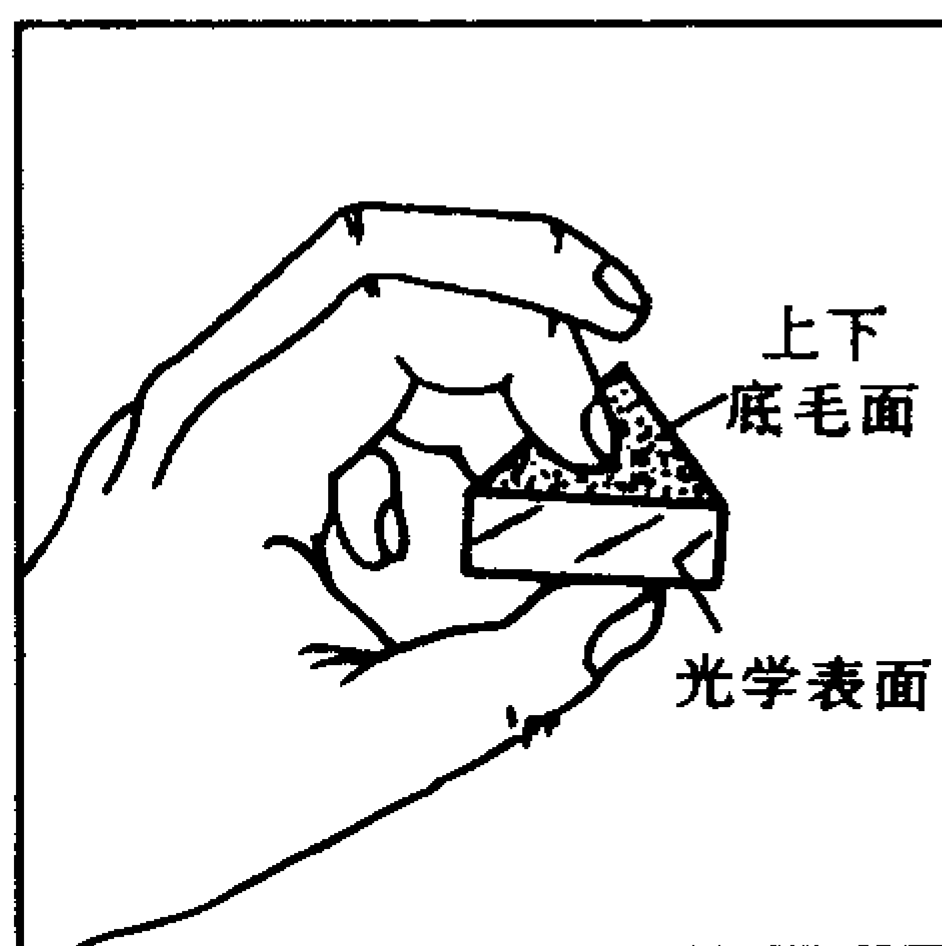
(5) 对于光学仪器中机械部分应注意添加润滑剂,以保持各转动部分灵活自如,平稳连续,并注意防锈,以保持仪器外貌光洁美观.

(6) 仪器长期不使用时,应将仪器放入带有干燥剂(硅胶)的木箱内,防止光学元件受潮、发生霉变,并做好定期检查,发现问题

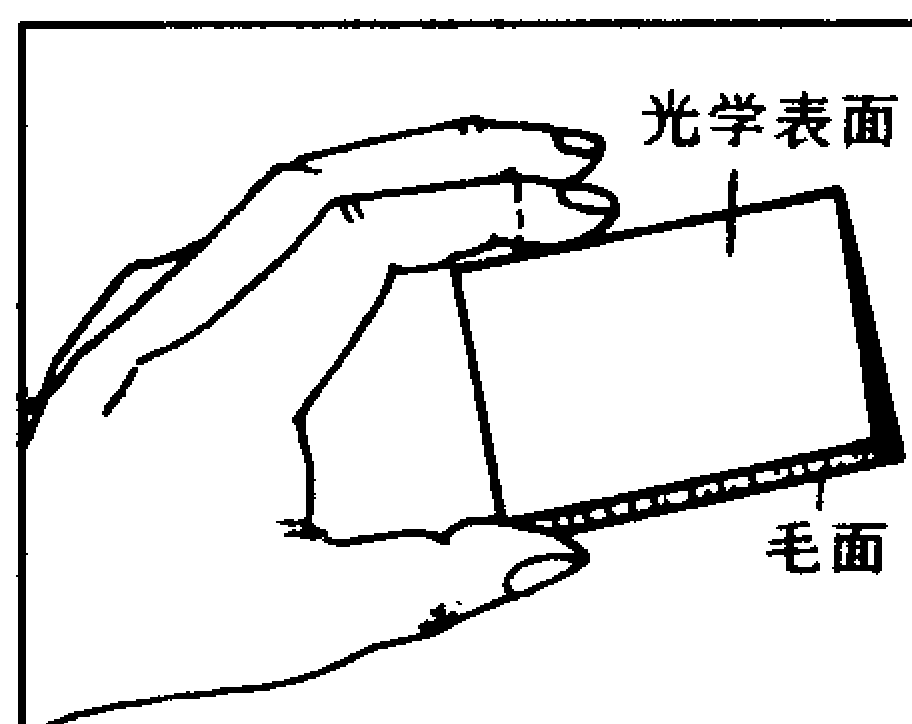
及时处理.



(a)手拿透镜的正确姿势



(b)手拿棱镜的正确姿势



(c)手拿光栅的正确姿势

图0-4-1

§5 实验数据处理

为了便于在实验中参考和利用,现将数据处理的基础知识,简要叙述如下.

1. 直接测量的最佳值

(1) 算术平均值

设对某一物理量在相同条件下,测量 n 次,测量值为 x_1、x_2、

…、x_n，其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \qquad (0-5-1)$$

一般取算术平均值为直接测量的最佳值.

(2) 标准差

测量列(x_i)的标准差 $s(x)$用下式计算

$$s(x)=\sqrt{\Sigma(x_i-\bar{x})^2/(n-1)}=\sqrt{[\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2/n]/(n-1)} \qquad (0-5-2)$$

平均值的标准差 $s(\bar{x})$为

$$s(\bar{x})=s(x)/\sqrt{n}=\sqrt{[\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2/n]/n(n-1)} \qquad (0-5-3)$$

(3) 测量值的取舍

在 n 次测量中，可能有的测量值明显偏小或偏大，在误差理论中给出一些数据取舍的判据，在此应用格罗布斯判据.

设平均值为 $\bar{x}$，测量列标准差为 s，测量值个数为 n，则可以保留的测量值 x_i 的量值范围为

$$(\bar{x}-G_n\cdot s)\leqslant x_i\leqslant(\bar{x}+G_n\cdot s) \qquad (0-5-4)$$

式中 G_n 为对应n 个测量值的格罗布斯判据系数，可在下表中查出. 在上记范围外的测量值为出现概率很小的可疑值，可以舍弃.

舍去可疑值后，应重新计算平均值为最佳值，标准差也应重新计算.

格罗布斯判据系数(G_n)表：

n	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.29	2.37	2.44	2.50	2.56

2. 间接测量的最佳值

设物理量 Y 是m 个物理量($X_1,X_2,\cdots,X_m$)的函数

$$Y=f(X_1,X_2,\cdots,X_m) \qquad (0-5-5)$$

由各 X_i 求 Y 的方法有二：

(1) 将各 X_i 的测量平均值 $\bar{x}_i$ 代入函数式求 Y 的测量值 y：

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_m) \qquad (0-5-6)$$

此为"先平均法".

(2) 将各 X_i 分别取一值求 y_i，再求 y_i 的平均值 $\bar{y}$ 为 Y 的最佳值

$$\bar{y} = \Sigma f(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{mi})/n \qquad (0-5-7)$$

此为"后平均法".

对于非线性函数，两种方法的结果是不一致的. 但是在多数物理测量中，二者的差异和测量误差相比并不显著，因此两方法一般均可使用. 不过方法(2)要求各 X_i 的测量值的数目相同，所以在使用上受到限制.

3. 最小二乘法直线拟合

设物理量 X、Y 间的函数关系为直线函数

$$Y = a + bX \qquad (0-5-8)$$

参数 a、b 之值可从 n 组 X、Y 测量值 (x_i, y_i) 求出，这一过程就是直线拟合.

直线拟合的方法有图解法、分组求差法和最小二乘法，而以最小二乘法结果为最佳.

按最小二乘法，对 n 组 (x_i, y_i) 测量值求出下列总和：

$$\Sigma x_i,\ \Sigma x_i^2,\ \Sigma y_i,\ \Sigma y_i^2,\ \Sigma x_i y_i$$

又令

$$\left.\begin{aligned} s_{xx} &\equiv \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2/n \\ s_{yy} &\equiv \Sigma y_i^2 - (\Sigma y_i)^2/n \\ s_{xy} &\equiv \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i/n \end{aligned}\right\} \qquad (0-5-9)$$

假设 x_i 的误差对参数 a、b 的影响和 y_i 的误差影响相比可以忽略，y_i 为等精度测量值时，则 a、b 的最小二乘法估计值 $\hat{a}$、$\hat{b}$ 为

$$\left.\begin{aligned}\hat{b} &= s_{xy}/s_{xx} \\ \hat{a} &= (\Sigma y_i - \hat{b}\cdot\Sigma x_i)/n\end{aligned}\right\} \qquad (0-5-10)$$

X、Y 的关联系数估计值 $\hat{r}$ 为

$$\hat{r} = s_{xy}/\sqrt{s_{xx}\cdot s_{yy}} \qquad (0-5-11)$$

$\hat{a}$、$\hat{b}$ 的标准差为

$$\left.\begin{aligned}s_b &= [(1-\hat{r}^2)/(n-2)]^{1/2}\hat{b}/\hat{r} \\ s_a &= (\Sigma x_i^2/n)^{1/2}\cdot s_b\end{aligned}\right\} \qquad (0-5-12)$$

4. 测量不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值，但实际上在测量时由于多种原因，必然使测量值有误差. 因而测得值不能准确表达真值，但是测量误差一般不会很大，可以设想真值是在测得值附近的一个范围中，测量不确定度就是对此量值范围的评定.

设测得值为 x，测量不确定度为 u，则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 之中. 显然测量不确定度越小，测得值偏离真值也就越小，用测得值表示真值的可靠性就越大.

测量不确定度常以估计标准差去表示，这时称其为标准不确定度。

测量不确定度的来源有许多方面，但可分为两类. 一类来源于偶然效应，如实验者的操作、读数，实验条件的起伏引起的测量值的变化，在多次重复测量时，其影响变化不定，表现为测量值的分散；另一类来源于系统性效应，如计量器具的基本误差，实验环境与实验原理的要求有差异等等，在多次重复测量时，其影响基本上恒定，因而此种效应使测定值有一定的偏离，但不会引起分散. 对此两类效应引入的不确定度要分别评定.

(1) 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然性效应，重复测量的测量值 x_1、x_2、…、x_n 是分散的，可用统计方法求其标准差. 这时算术平均值的标准不确定度 $u(x)$ 等于其标准差 $s(\bar{x})$，是标准不确定度的 A 类评定，即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2/n(n-1)} \tag{0-5-13}$$

(2) 标准不确定度的B类评定

评定不确定度有的用统计方法，即A类评定，另外有些不能用统计方法，这些用非统计方法评定的不确定度就是B类评定。例如，用螺旋测微计测一棒的直径 d，测量 n 次，得 n 个 d_i 值，计算平均值 $\bar{d}$ 及其标准差 $s(\bar{d})$，则 d 的A类标准不确定度 $u_A(d) = s(\bar{d})$，它是 d 的标准不确定度的一部分，另外螺旋测微计自身的误差也给 d 引入不确定度，它不能用统计方法求出，是B类评定 $u_B(d)$。将 $u_A(d)$ 和 $u_B(d)$ 合成之后，方可得到 d 的合成标准不确定度。

标准不确定度的B类评定可有几种不同的情况，有的计量器具在说明书或检定书上注明总的不确定度，有些可以从国家有关标准（如国家计量技术规范，符号JJG）查出其允许误差，有些则参照有关资料或仪器的最小分度值去确定其极限误差。

从对计量器具误差的测量与分析来说，一般认为计量器具的误差服从均匀分布，如极限误差为 Δ，则其标准差为 $\Delta/\sqrt{3}$，所以其B类标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3} \tag{0-5-14}$$

上述关于B类标准不确定度的评定，只是B类评定问题的一部分，实际上还有其他方面不服从均匀分布的问题，在我们的实验里，可以均用上式处理。

(3) 合成标准不确定度

直接测量：设被测量 X 的不确定度来源有 k 项，不论它是A类评定或B类评定，都是等价的，均按方和根去合成，即合成标准不确定度 $u_c(x)$ 为

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} u^2(x_i)} \tag{0-5-15}$$

间接测量：设 $y=y(x_1,x_2,\cdots,x_m)$，已知各 x_i 的合成标准不确定 $u(x_i)$，则 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$u_c(y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \qquad (0-5-16)$$

当 y 是 x_i 的幂函数时，即

$$y=A\cdot x_1^{a_1}\cdot x_2^{a_2}\cdots x_m^{a_m} \qquad (0-5-17)$$

式中 A 为无量纲量，则

$$u_c(y)=y\cdot\sqrt{\Sigma\left[a_i\frac{u(x_i)}{x_i}\right]^2} \qquad (0-5-18)$$

测量不确定度的计算比较繁琐，在一定条件下可以简化. 即当测量误差中，偶然误差为主时，可以只计算 A 类评定，略去 B 类评定；当系统误差为主时，可以只计算 B 类评定，略去 A 类评定.

(4) 不确定度计算举例

用双棱镜测量光波波长(λ)的实验，测量公式为

$$\lambda=\sqrt{d_1d_2}\,\frac{\Delta x}{n}\,\frac{1}{D}$$

式中 d_1 为二虚光源经透镜 L_1 所成二亮线(光源实像)的间隔，d_2 为透镜移至 L_2 时二亮线的间隔，Δx 为 n 个条纹间隔的总和，D 为虚光源到其实像的距离.

实验时 d_1、d_2、Δx 均由精度 0.01 mm 的测微目镜测出，D 由米尺测量.

测量例：　$\bar{d}_1=2.713$ mm，　$s(\bar{d}_1)=0.021$ mm

$\bar{d}_2=0.711$ mm，　$s(\bar{d}_2)=0.002$ mm

$\overline{\Delta x}=6.335$ mm，　$s(\overline{\Delta x})=0.010$ mm

$D=73.72$ cm　　$n=20$

算出　$\lambda=\sqrt{0.2713\times0.0711}\times0.6335\ \text{cm}/(20\times73.72)$

$=5.967\times10^{-5}$ cm

计算不确定度：

(1) d_1 的标准不确定度 $u(d_1)$

来源于

$$\begin{cases}\text{重复测量 } u_A(d_1)=0.002\ 1\ \text{cm} \\ \text{从估计 } \Delta \text{ 等于仪器精度 } 0.001\ \text{cm，由仪器引入的不确定度 } u_B(d_1) \\ u_B(d_1)=0.001\ \text{cm}/\sqrt{3}=0.000\ 58\ \text{cm}\end{cases}$$

则 $u(d_1)=\sqrt{0.002\ 1^2+0.000\ 58^2}\ \text{cm}=0.002\ 2/\text{cm}$

(2) 计算 $u(d_2)$

来源于$\begin{cases}\text{重复测量 } u_A(d_2)=0.000\ 2\ \text{cm} \\ \text{仪器误差(同 } d_1\text{) } u_B(d_2)=0.000\ 58\text{cm}\end{cases}$

$$u(d_2)=\sqrt{0.000\ 2^2+0.000\ 58^2}\ \text{cm}=0.000\ 61\ \text{cm}$$

(3) 计算 $u(\Delta x)$

来源于$\begin{cases}\text{重复测量 } u_A(\Delta x)=0.001\ 0\ \text{cm} \\ \text{仪器误差(同 } d_1\text{) } u_B(\Delta x)=0.000\ 58\ \text{cm}\end{cases}$

$$u(\Delta x)=\sqrt{0.001\ 0^2+0.000\ 58^2}=0.001\ 2\ \text{cm}$$

(4) 计算 $u(D)$

来源仪器误差，估计 $\Delta=0.1$ cm，$u_B(D)=0.1\ \text{cm}/\sqrt{3}=0.058$ cm

计算 $u_c(\lambda)$

$$u_c(\lambda)=5.967\times10^{-5}\left[\left(\frac{0.002\ 2}{2\times0.271\ 3}\right)^2+\left(\frac{0.000\ 61}{2\times0.071\ 1}\right)^2+\left(\frac{0.001\ 2}{0.633\ 5}\right)^2+\left(\frac{0.058}{73.72}\right)^2\right]^{1/2}\text{cm}$$
$$=0.037\times10^{-5}\ \text{cm}$$

结果 $\lambda=(5.97\pm0.04)\times10^{-5}$ cm

5. 测量结果的评价

由于不确定度是比较全面反映测量的误差，所以评价实验结果的主要依据就是不确定度.

(1) 测量结果 y 与公认值 y_0 之差，是否在测量误差范围内？

判断的依据可粗略地用$|y-y_0|/u_c(y)>3$否？如果不大于3就可认为$|y-y_0|$在测量误差范围内，测量结果是可以接受的.

(2) 合成$u_c(y)$的各项中有否比较突出大的，原因是什么？有否可能改进？

(3) 各x_i的$u(x_i)$评定中，有否A类评定明显大于B类评定？如果有，就说明该项偶然误差过大，值得分析.

实验一　薄透镜焦距的测定

目的

1. 学会调节光学系统使之共轴，并了解视差原理的实际应用；

2. 掌握薄透镜焦距的常用测定方法.

练习一　成像公式法测透镜焦距

仪器和用具

光具座，会聚透镜(两块)，发散透镜，物屏，白屏，平面反射镜，尖头棒，T形辅助棒，光源.

原理

如图 1－1 所示，设薄透镜的像方焦距为 f'，物距为 p，对应的像距为 p'，则透镜成像的高斯公式为

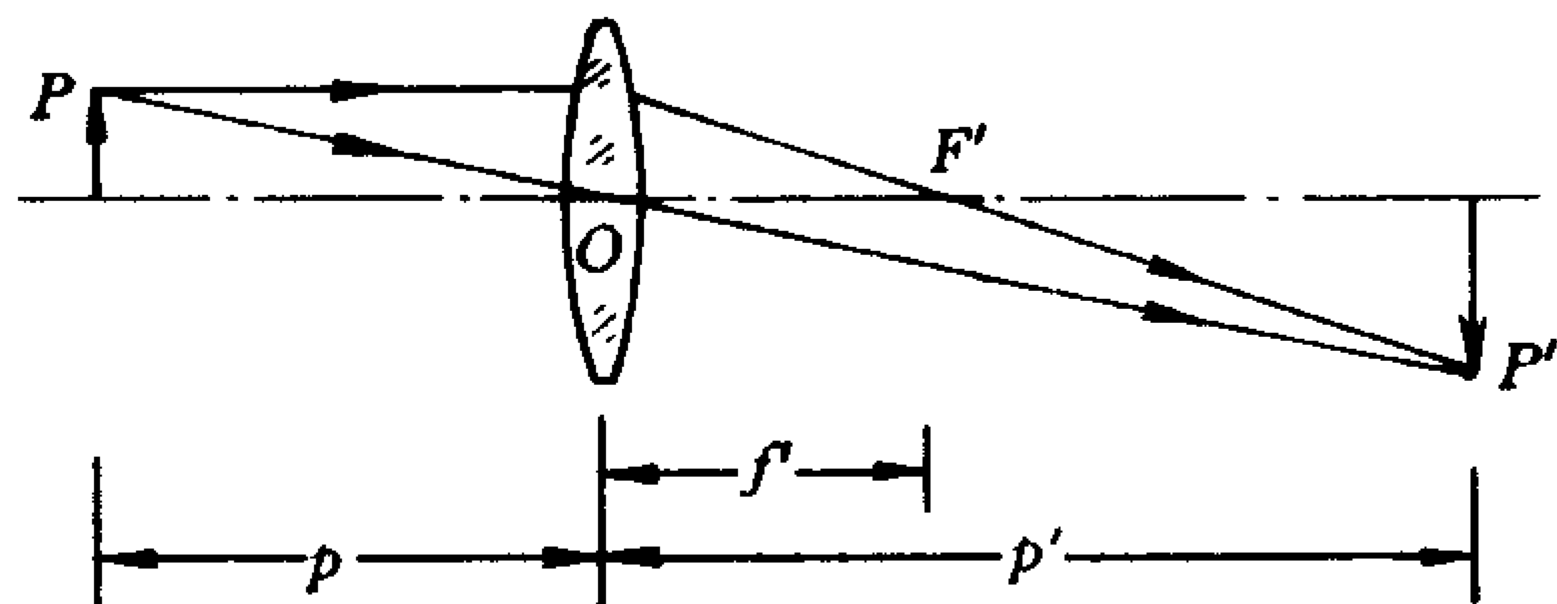


图 1－1

$$\frac{1}{p'}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f'} \tag{1-1}$$

故 $$f' = \frac{pp'}{p - p'} \qquad (1-2)$$

应用上式时，必须注意各物理量所适用的符号定则. 本书规定：距离自参考点（薄透镜光心）量起，与光线进行方向一致时为正，反之为负. 运算时已知量须添加符号，未知量则根据求得结果中的符号判断其物理意义.

一、测量会聚透镜焦距的方法

1. 测量物距与像距求焦距

因为实物作为光源，其发散的光经会聚透镜后，在一定条件下成实像，故可用白屏接取实像加以观察，通过测定物距和像距，利用(1-2)式即可算出 f'.

2. 由透镜两次成像求焦距

设保持物体与白屏的相对位置不变，并使其间距离 l 大于 $4f'$，则当会聚透镜置于物体与白屏之间时，可以找到两个位置，白屏上都能得到清晰的像，如图 1-2 所示. 透镜两个位置（Ⅰ与Ⅱ）之间的距离的绝对值为 d.（问：为何要求 $l>4f'$?）

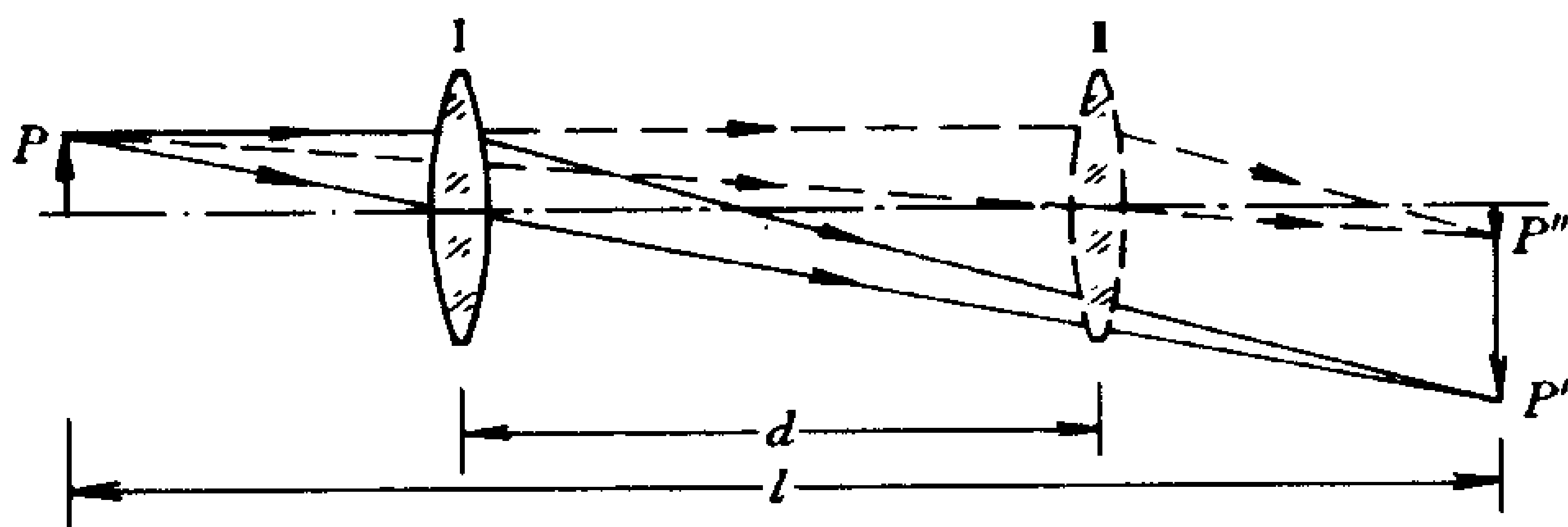


图 1-2

运用物像的共轭对称性质，容易证明

$$f' = \frac{l^2 - d^2}{4l} \qquad (1-3)$$

式(1-3)表明，只要测出 d 和 l，就可以算出 f'. 由于 f' 是通过透镜两次成像而求得的，因而这种方法称为二次成像法，或称为

贝塞耳法. 同时可以看出,利用式(1-1)、(1-2)时,都是把透镜看成无限薄的,物距和像距都近似地用从透镜光心算起的距离来代替,而这种方法中则毋须考虑透镜本身的厚度. 因此,用这种方法测出的焦距一般较为准确.

3. 由光的可逆性原理求焦距

如图1-3所示,当尖头棒 Q 放在透镜L的物方焦面上时,由 Q 发出的光经透镜后将成为平行光;如果在透镜后面放一与透镜光轴垂直的平面反射镜M,则平行光经M反射后将沿原来的路线反方向进行,并成像 Q' 于物平面上. Q 与L之间的距离,就是透镜L的像方焦距 f'. 这个方法是利用调节实验装置本身使之产生平行光以达到调焦的目的的,所以又称为自准直法.

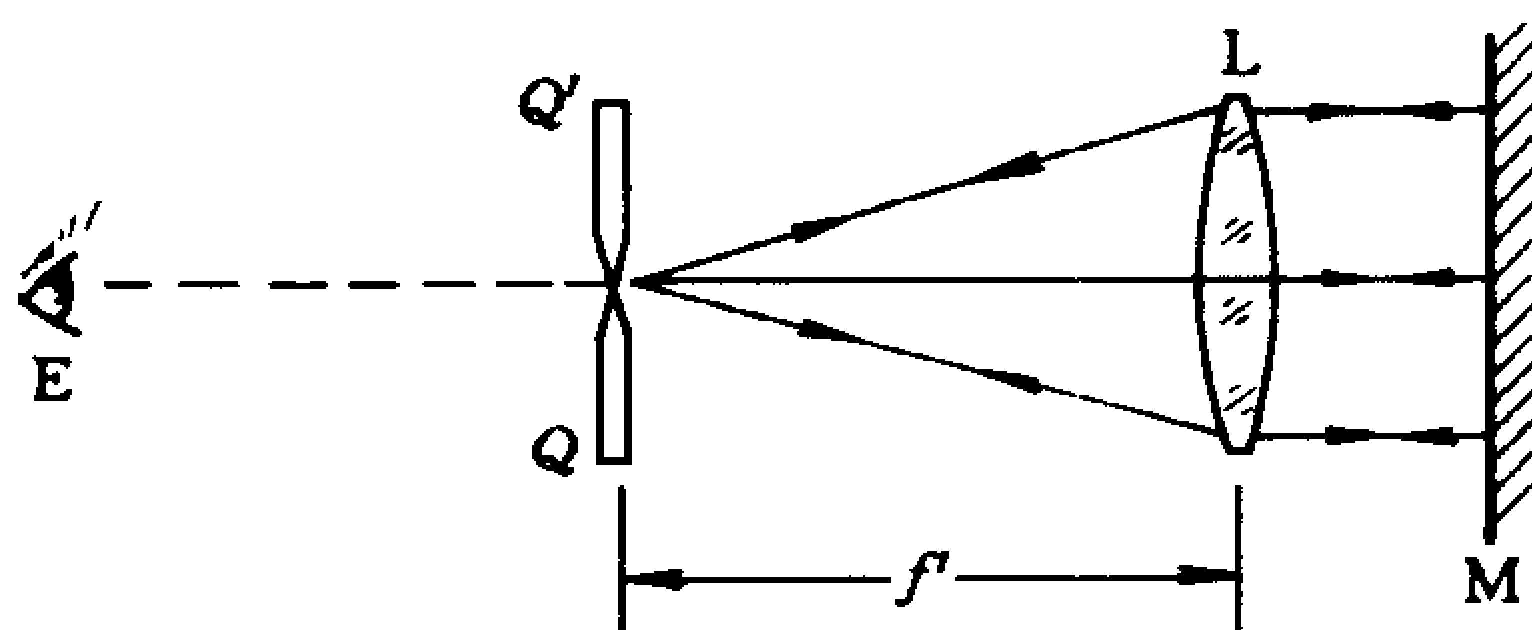


图1-3

二、测定发散透镜焦距的方法

1. 由辅助透镜成像求焦距

如图1-4所示,设物 P 发出的光经辅助透镜 L_1 后成实像于 P',而加上待测焦距的发散透镜L后使成实像于 P'',则 P' 和 P'' 相对于L来说是虚物体和实像. 分别测出L到 P' 和 P'' 的距离,根据式(1-2)即可算出L的像方焦距 f'.(问:加入凹透镜L后,一定有实像 P'' 吗? 为什么?)

2. 由平面镜辅助确定虚像位置求焦距

如图1-5所示,物 P 经待测发散透镜L成正立的虚像于

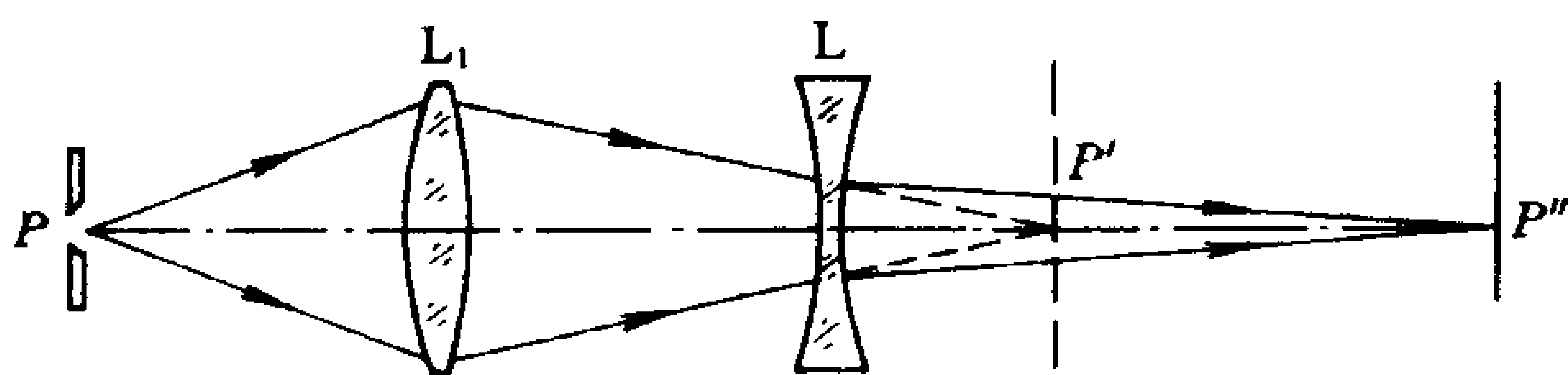


图 1－4

P'. 若在 L 前放置指针 Q 和平面镜 M,则观察者在 E 处可同时看到 P'与Q 在 M 镜中的反射像 Q',移动 Q 调节Q',用视差法使 P'与 Q'重合,从而根据平面镜成像的对称性求出虚像的像距 $\overline{OP'}$,再由式(1－2)算出 L 的像方焦距 f'.

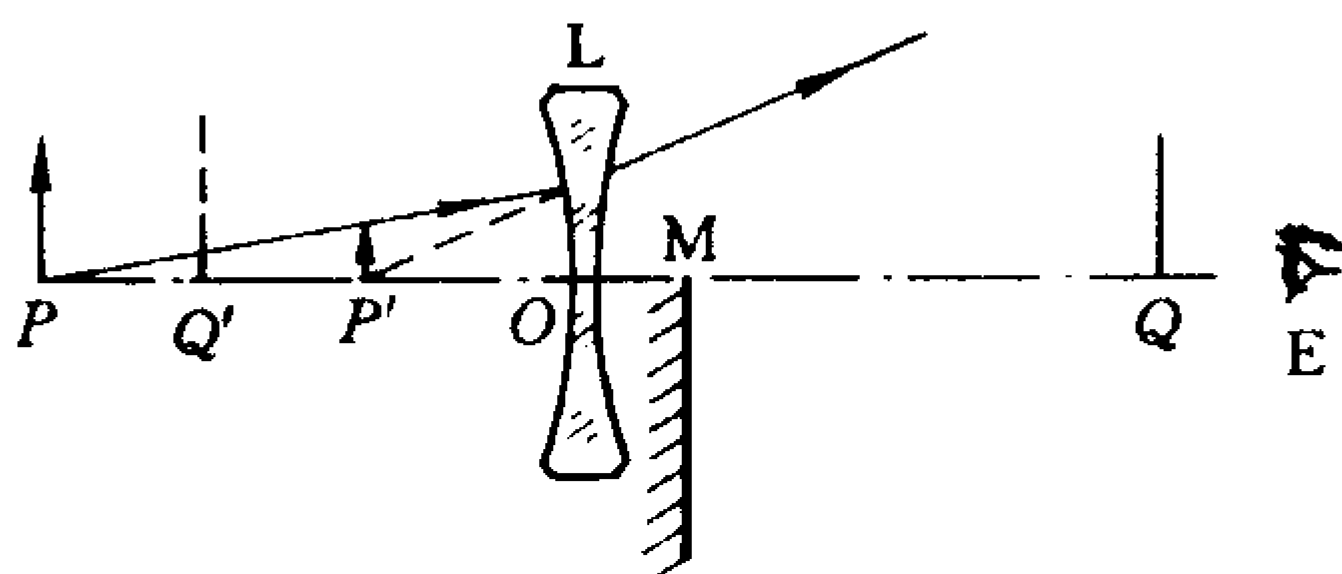


图 1－5

实验内容

1. 粗测待测凸透镜的焦距 f'(方法自己考虑).

2. 共轴调节

将照明光源、物屏、待测透镜和成像的白屏依次放在光具座的导轨上,按照 §3－1 所述方法,调节各光学元件的光轴,使之共轴,并平行于导轨的基线(等高).(问:为什么要调共轴、等高呢?)

3. 物距像距法测凸透镜焦距

用具有箭形开孔的金属屏为物,用准单色光照明. 如图 1－1,使物屏与白屏之间距离大于 $4f'$,移动待测透镜,直至白屏上呈现出箭形物体的清晰像. 记录物、像及透镜的位置,依式(1－2)算出 f'. 改变屏的位置,重复几次,求其平均值.

4. 两次成像法测凸透镜焦距

将物屏与白屏固定在相距大于 $4f'$ 的位置，测出它们之间的距离 l，如图 1－2 所示. 移动透镜，使屏上得到清晰的物像，记录透镜的位置. 移动透镜至另一位置，使屏上又得到清晰的物像，再记录透镜的位置. 由式(1－3)求出 f'. 改变屏的位置，重复几次，求其平均值.

5. 自准直法测凸透镜焦距

按图 1－3 所示，以尖头棒为物 Q，移动透镜 L 并适当调整平面镜的方位，沿光轴方向可看到在尖头棒上方出现一倒立的尖头棒的像 Q'，调整透镜位置用视差法使 Q 与 Q' 对齐(无视差)，测出尖头棒及透镜的位置，二者之差即透镜的焦距. 重复几次. (也可以不用尖头棒而用开孔的物屏去测). (问：如何根据视差去判断 Q 和 Q' 是否对齐，如果未对齐应如何根据视差去移动 Q?)

6. 辅助透镜法测凹透镜焦距

按图 1－4 所示，先用辅助会聚透镜 L_1 把物体 P 成像在 P' 处的屏上，记录 P' 的位置，然后将待测发散透镜 L 置于 L_1 与 P' 之间的适当位置，并将屏向外移，使屏上重新得到清晰的像 P''，分别测出 P'、P'' 及发散透镜 L 的位置，求出物距 p 和像距 p'，代入式(1－2)，算出 f'(注意物距 p 应取的符号). 改变凹透镜的位置，重复几次.

7. 视差法测凹透镜焦距

按图 1－5 所示，物体 P 经凹透镜 L 后成正立虚像于 P'，在 L 前另置尖头棒 Q 和平面反射镜 M(M 应略低于透镜 L)，观察者在 L 前可以同时看到 L 中 P 的虚像 P' 和 M 中 Q 的虚像 Q'. 移动尖头棒 Q，直至 P' 与 Q' 之间无视差，即当观察者眼睛左右移动时，P' 与 Q' 无相对运动，这时 P' 与 Q' 共面. 若测出距离 QM 和 MO，则像距 $|p'| = QM - MO$，以物距 $|p| = OP$ 和 p' 代入(1－2)式，求出 L 的焦距 f'. 改变凹透镜的位置，重复几次.

8. 对测量作比较和评价.

注意事项

1. 进行几何光学实验，验证透镜成像规律，测定透镜焦距等实验，一般不直接使用发光物体或有三维分布的立体物为物体，而以平面的有一定几何形状的开孔金属屏为物（或用分划板、平面网格）.

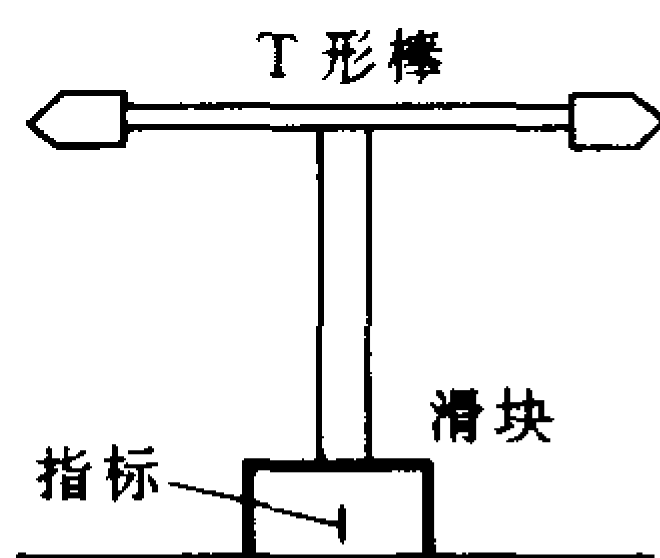


图 1－6

2. 测量物、透镜及像的位置时，要检查滑块上的读数准线和被测平面是否重合？如果不一致将使由这些位置算出的距离有误差，可用如图 1－6 的 T 字型辅助棒去测，位置统一由辅助棒所在滑块的准线去读（图 1－7），可防止上述不一致引入的误差.

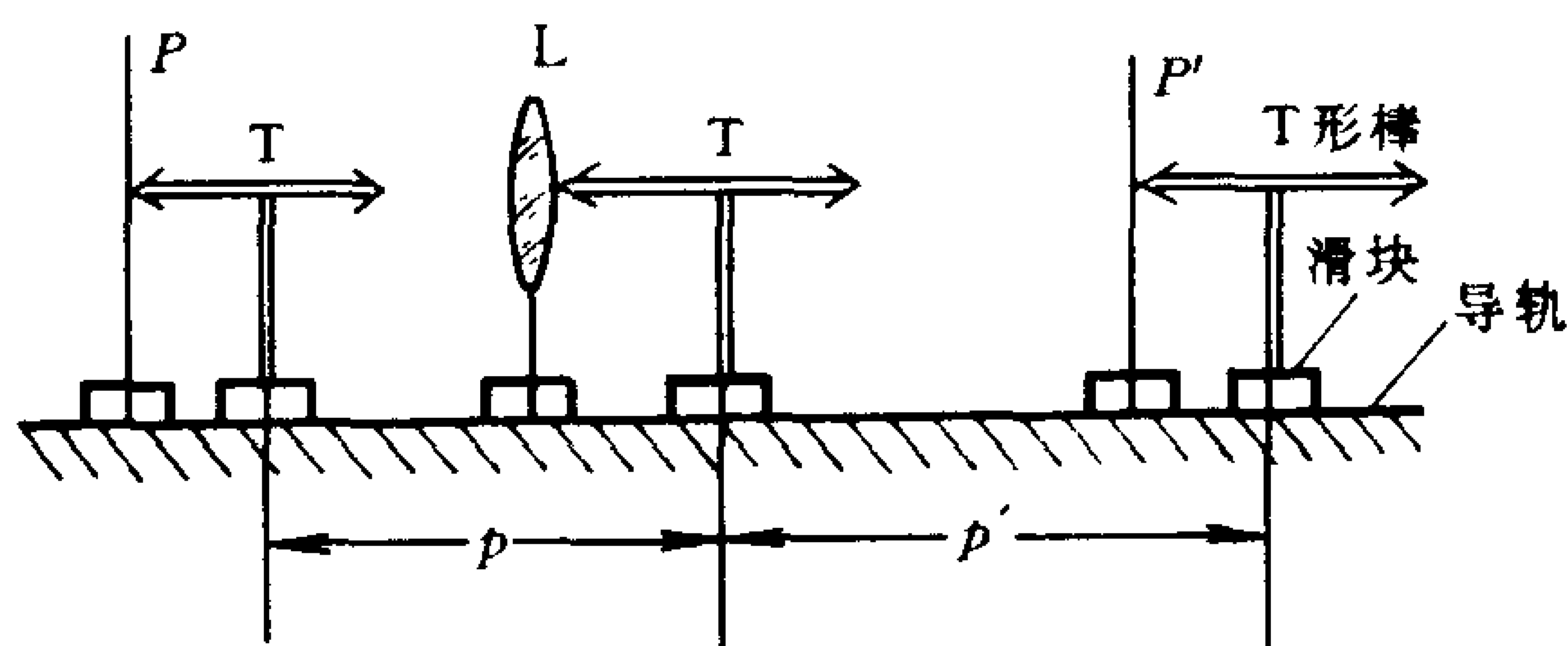


图 1－7

3. 人眼对成像的清晰度的分辨能力不是很强，因而像屏在一小范围 $\Delta p'$ 内移动时，人眼所见的像是同样清晰的，此范围为景深. 为了减少由此引入的误差，可由近向远和由远向近移动白屏，去探测像的位置，并取二位置的平均值为像的位置.

4. 在透镜前加一口径 D 的光阑，可以满足近轴光线成像的条件，相对孔径（D/f'）越小像差越小，但是景深将增大，因此是否要加光阑、加多大的光阑要全面考虑.

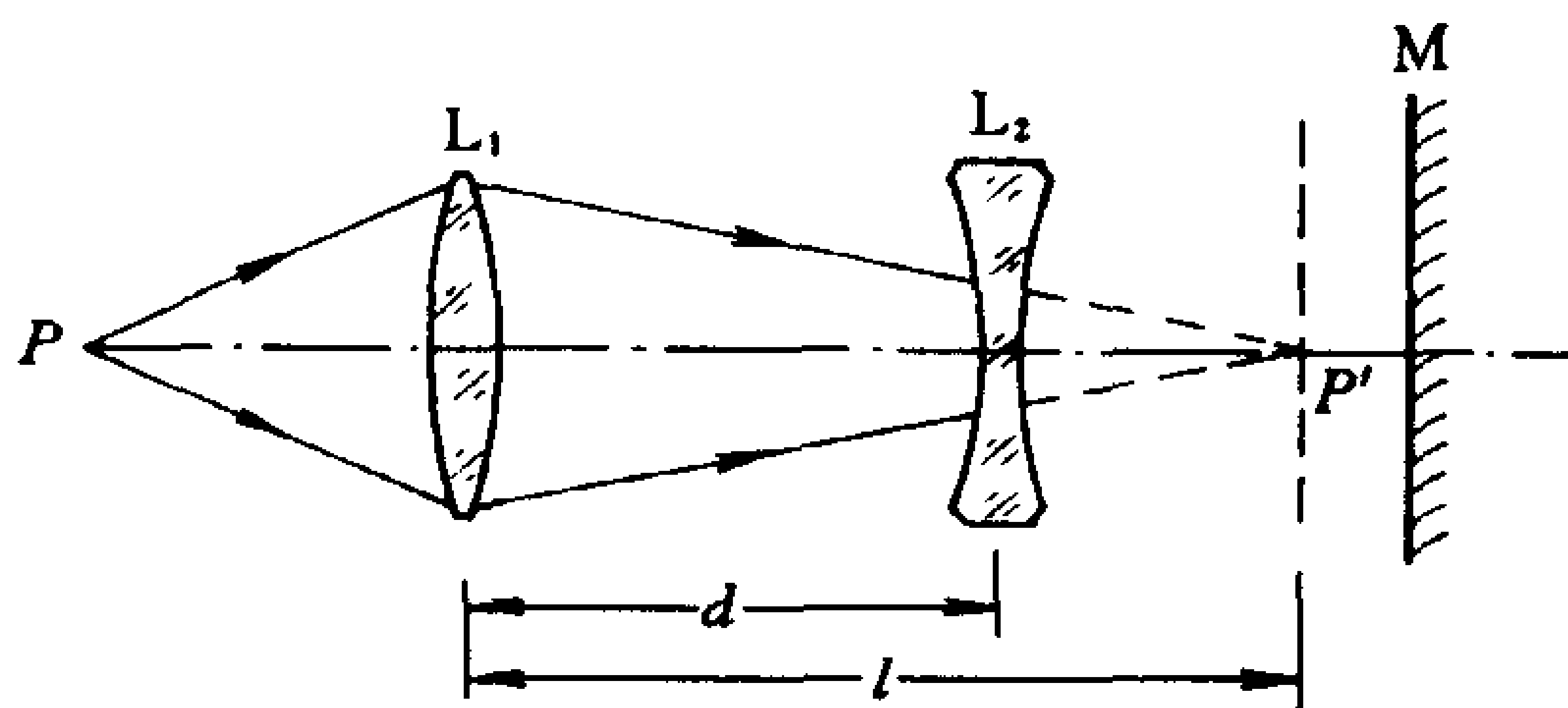


图 1－8

复习思考题

1. 如会聚透镜的焦距大于光具座的长度，试设计一个实验，在光具座上能测定它的焦距.

2. 点光源 P 经会聚透镜 L_1 成实像于 P'点(图 1－8)，在会聚透镜 L_1 与 P'之间共轴放置一发散透镜 L_2；垂直于光轴放一平面反射镜 M，移动发散透镜至一合适位置，使 P 通过整个系统后形成的像仍重合在 P 处. 如何利用此现象测出发散透镜焦距?

练习二　准直管法测透镜的焦距

仪器和用具

550 型平行光管(准直管)，可调式平面反射镜，分划板(玻罗板)，测微目镜，待测透镜.

原理

练习一所述的几种测量透镜焦距的方法，测量的相对误差均较大. 若需进一步提高测量的准确度，可利用准直管进行精密测量.

准直管就是一种能发射平行光束的精密光学仪器，也是装校和调整光学仪器的重要工具之一. 它有一个质量优良的准直物镜，其焦距的数值是经过精确测定的. 本实验采用 CPG－550 型

自准直平行光管，其结构如图1－9所示．光源9发出的光，经分

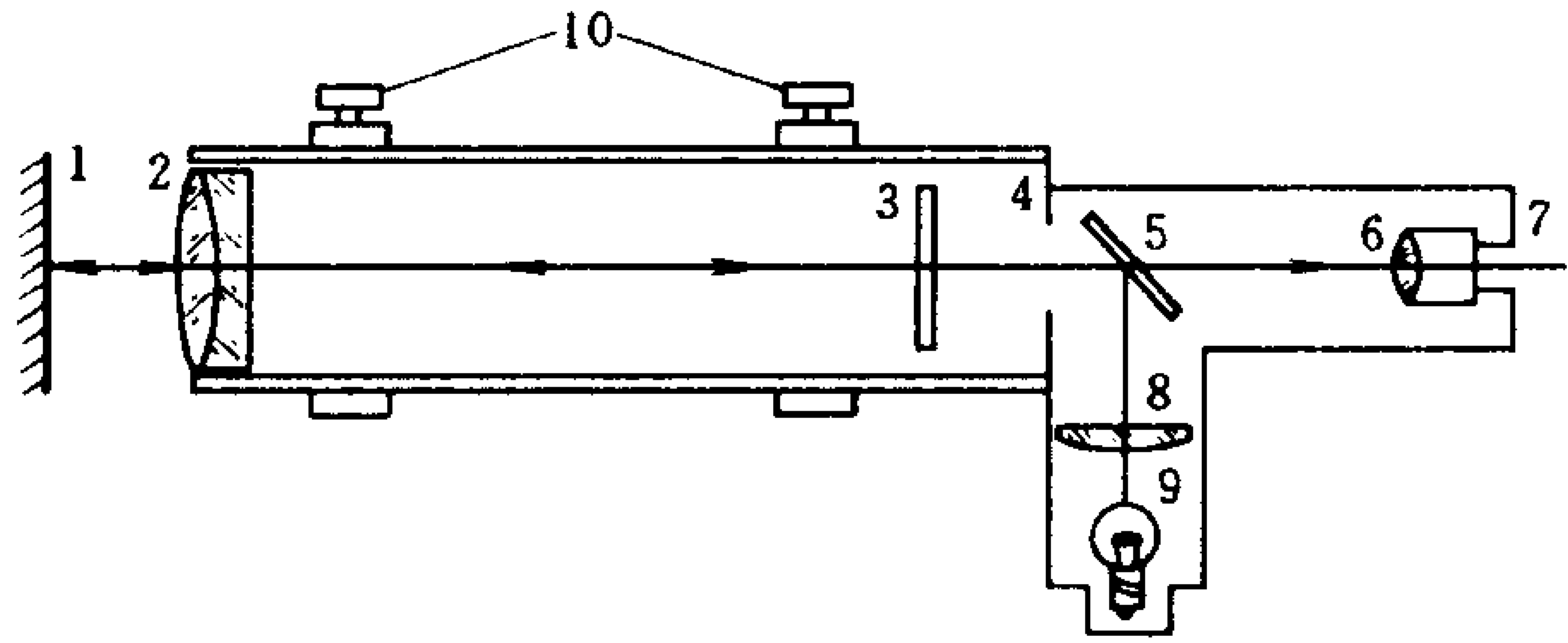


图 1－9

1．可调式反射镜；2．物镜；3．分划板；4．光阑；5．分光板；6．目镜；7．出射光瞳；8．聚光镜；9．光源；10．十字螺钉

光板 5 反射后照亮分划板 3，利用平面反射镜 1 和目镜 6，应用自准直原理可将分划板准确定位在物镜的焦面上．因此，分划板的像将成于无穷远．

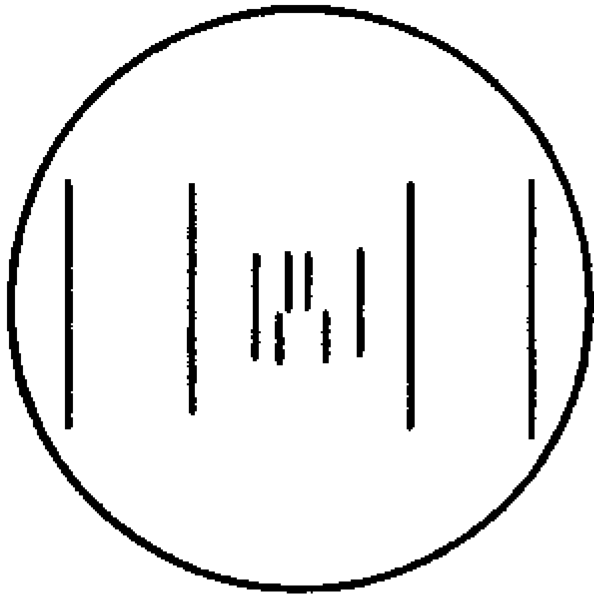


图 1－10

用准直管测定透镜焦距的光路如图 1－11 所示，将刻有五组线对的分划板（称为玻罗板（图 1－10））调节到物镜 L_o 的焦平面上．移开平面镜，在准直管物镜的前方放置待测焦距的凸透镜，则在待测透镜的像方焦面 F' 上，将获得玻罗板刻线的像．

从图中几何关系可以看出待测透镜的焦距 f'_x 为

$$f'_x = -f\frac{y'}{y} \tag{1－4}$$

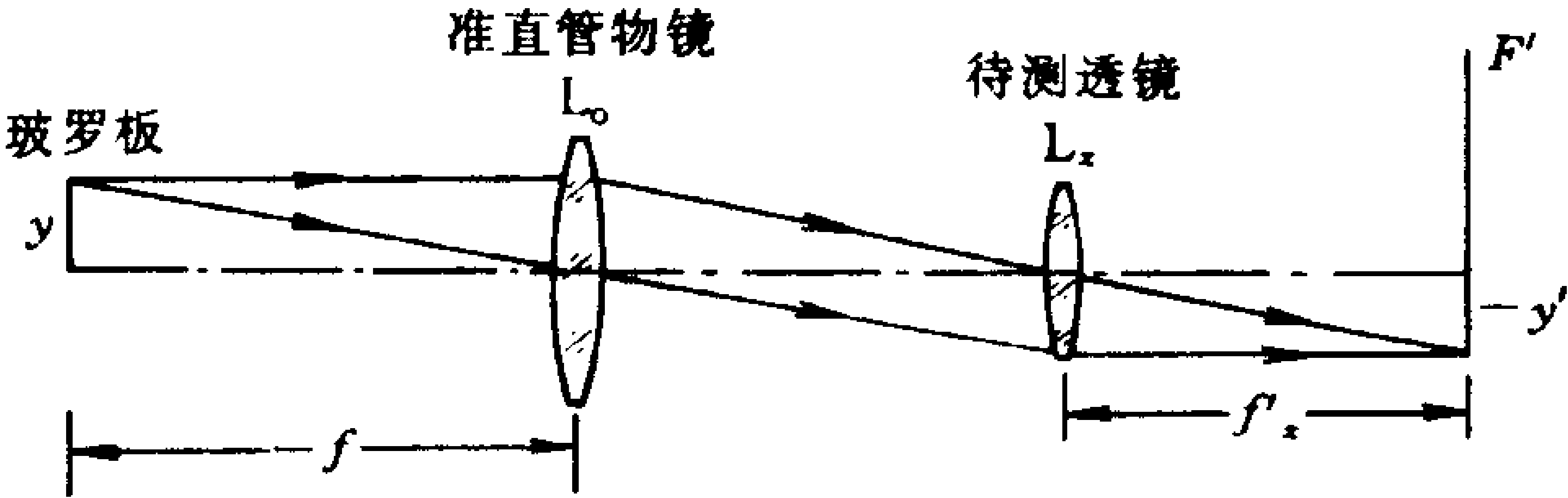


图 1－11

式中 y 是在玻罗板上所选用线对间距的实测值，y' 是玻罗板上对应像的间距的实测值，f 是准直管物镜像方焦距的实测值. 为了保证测量精度，一般待测透镜的焦距应小于准直管物镜焦距的二分之一.

测量内容

1. 调节准直管

使用前必须对准直管进行调节，分划板严格处于物镜的焦平面上；使分划板的中心同准直管光轴重合.

(1) 将准直管面对平面反射镜，使玻罗板的刻线对位于竖直方向.

(2) 调节目镜，使目镜中能清楚地看到玻罗板上的刻线对.

(3) 调节平面反射镜，使由准直管射出的光束重新返回准直管.

(4) 细心调节分划板座的前后位置，使目镜中能同时清楚地看到刻线对和它反射回来的像，这时玻罗板已基本调节在物镜的焦平面上.

(5) 调节平面反射镜的铅直和水平调节螺旋，使玻罗板上刻线对物、像重合，且无视差，这时玻罗板已和物镜的焦面严格共面.

(6) 松开准直管座上的十字螺钉(又称止动螺旋)，将准直管绕光轴转过 180°，如发现玻罗板上线对物像不再重合，这说明玻罗板中心同光轴还有些偏离.

(7) 分别调节平面反射镜及分划板中心调节螺旋，两者各调节一半，使玻罗板上线对物、像重合.

(8) 重复步骤(6)、(7)，反复调节，直到转动准直管时，线对的物和像始终重合. 至此，准直管已调节完毕.

2. 测定透镜的焦距

(1) 按图 1－12 所示放置好准直管、待测透镜及测微目镜，并使之共轴.

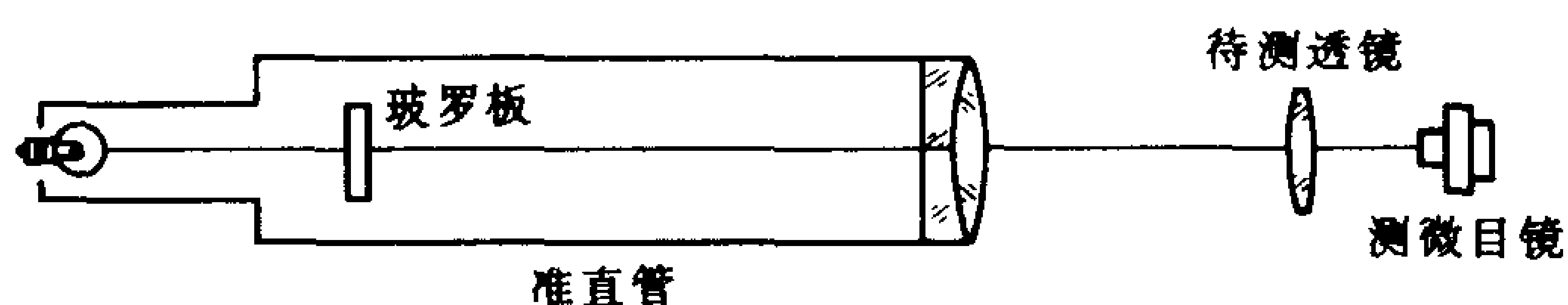


图 1-12

3. 沿光轴前后移动透镜,使在测微目镜中看到清晰的玻罗板的像.

4. 用测微目镜测出玻罗板的像上各线对的间距 y',重复几次,取平均值.

5. 以 y' 和玻罗板上线对的实测值 y、准直管物镜焦距 f',代入式(1-4)计算待测透镜的焦距.

复习思考题

1. 为什么说当准直管绕轴转过 180°时,十字线物像不重合是由于十字线中心偏离光轴的缘故? 试说明之.

2. 准直管测焦距的方法有哪些优点? 还存在哪些系统误差?

实验二　光具组基点的测定

目的

1. 加强对光具组基点的认识；

2. 学习测定光具组基点和焦距的方法.

原理

光学仪器中常用的光学系统，一般都是由单透镜或胶合透镜等球面系统共轴构成的. 对于由薄透镜组合成的共轴球面系统，其物和像的位置可由高斯公式

$$\frac{1}{f'}=\frac{1}{p'}-\frac{1}{p} \tag{2-1}$$

确定. 式中 f'为系统的像方焦距，p'为像距，p 为物距. 物距是从第一主面量到物的距离，像距是从第二主面量到像的距离，系统的像方焦距是从第二主面量到像方焦点的距离. 各量的符号从各相应主面，沿光线进行方向测量为正，反向为负.

又，共轴球面系统的物和像的位置，还可由牛顿公式表示，即

$$xx'=ff' \quad (f=-f') \tag{2-2}$$

式中 x 为从物方焦点量起的物方焦点到物的距离，x'为从像方焦点量起的像方焦点到像的距离. 物方焦距 f 和像方焦距 f' 分别是从第一、第二主面量到物方焦点和像方焦点的距离. 符号规定同上.

共轴球面系统的基点、基面具有如下的特性：

1. 主点和主面

若将物体垂直于系统的光轴放置在第一主点 H 处，则必成一个与物体同样大小的正立像于第二主点 H'处，即主点是横向放大率 $\beta=+1$ 的一对共轭点. 过主点垂直于光轴的平面，分别称为第

一、第二主面(图 2－1 中的 $MH, M'H'$).

2. 节点和节面

节点是角放大率 $\gamma = +1$ 的一对共轭点. 入射光线(或其延长线)通过第一节点 N 时，出射光线(或其延长线)必通过第二节点 N'，并与 N 的入射光线平行(图 2－1). 过节点垂直于光轴的平面分别称为第一、第二节面.

当共轴球面系统处于同一媒质时，两主点分别与两节点重合.

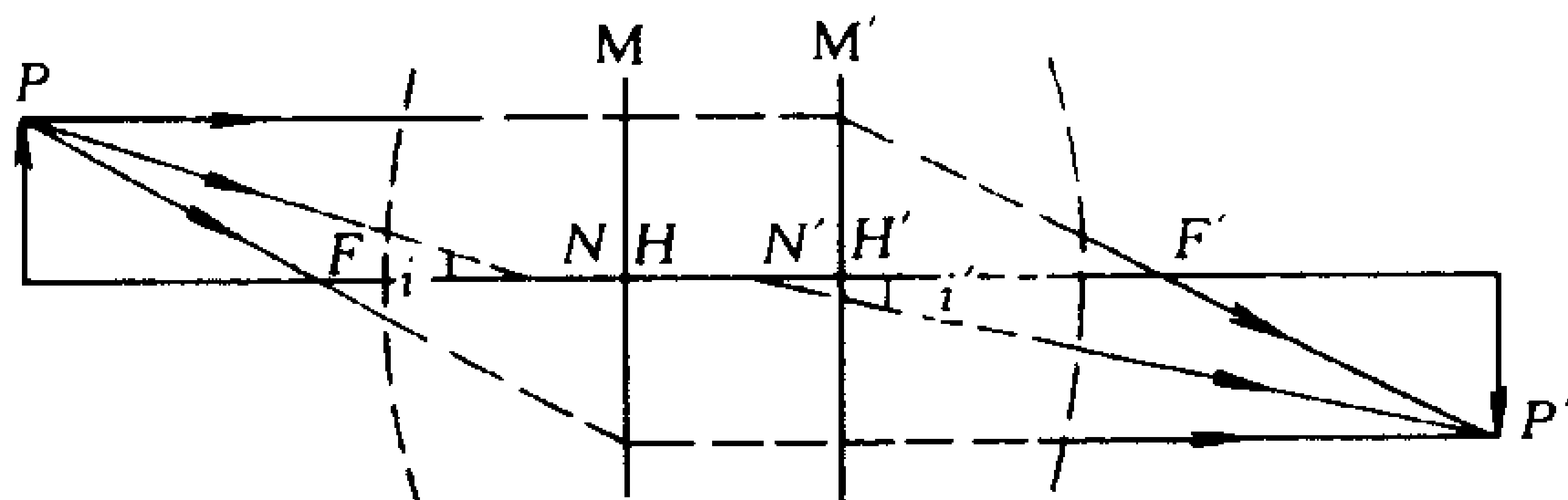


图 2－1

3. 焦点和焦面

平行于系统主轴的平行光束，经系统折射后与主轴的交点 F' 称为像方焦点；过 F' 垂直于主轴的平面称为像方焦面. 第二主点 H' 到像方焦点 F' 的距离，称为系统的像方焦距 f'. 此外，还有物方焦点 F、焦面和焦距 f.

显然，薄透镜的两主点与透镜的光心重合，而共轴球面系统两主点的位置，将随各组合透镜或折射面的焦距和系统的空间特性而异. 下面以两个薄透镜的组合为例进行讨论. 设两薄透镜的像方焦距分别为 f'_1 和 f'_2，两透镜之间距离为 d，则透镜组的像方焦距 f' 可由下式求出：

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{(f'_1 + f'_2) - d}, f = -f' \tag{2-3}$$

两主点位置

$$l' = \frac{-f'_2 d}{(f'_1 + f'_2) - d}$$
$$l = \frac{f'_1 d}{(f'_1 + f'_2) - d} \tag{2-4}$$

计算时注意 l'是从第二透镜光心量起，l 是从第一透镜光心量起．（问：试证明，对于二凸透镜组成的光具组，当 $d<f'_1+f'_2$时，$|l|+|l'|>d$；分析此种情况下，第一、第二主面可能的位置．）

练习一　用测节器测定光具组的基点

仪器和用具

光具座，测节器，薄透镜（几片），物屏，白屏，光源，准直透镜（焦距大一些），平面反射镜．

测节器原理

设有一束平行光入射于由两片薄透镜组成的光具组，光具组与平行光束共轴，光线通过光具组后，会聚于白屏上的 Q 点（图 2－2），此 Q 点即光具组的像方焦点 F'．以垂直于平行光的某一方向为轴，将光具组转动一小角度，可有如下两种情况：

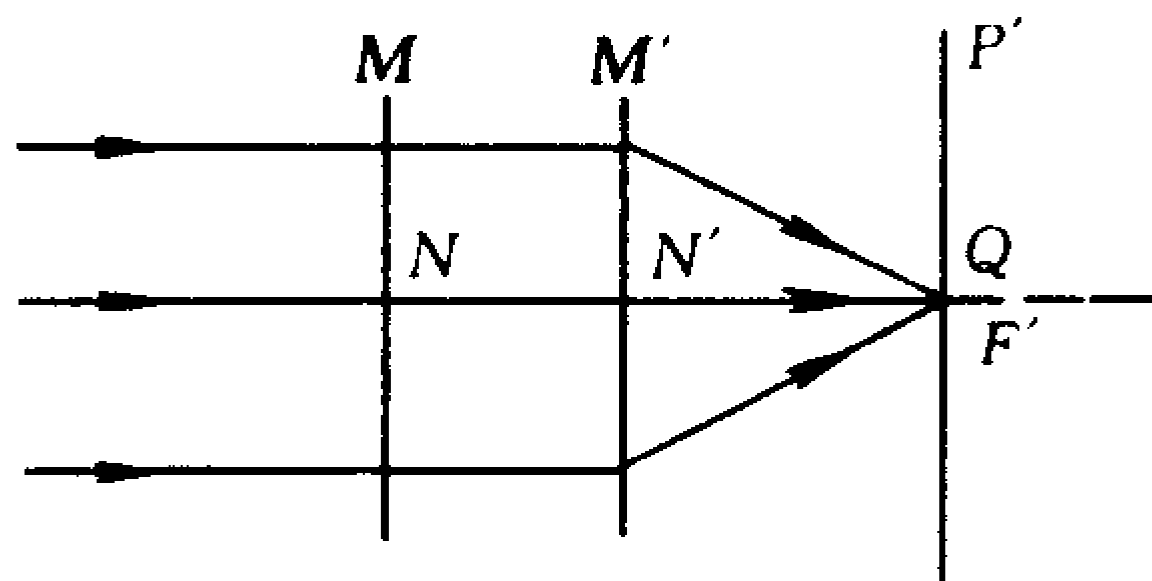


图 2－2

1．回转轴恰好通过光具组的第二节点 N'

因为入射第一节点 N 的光线必从第二节点 N'射出，而且出射光平行于入射光，现在 N'未动，入射光方向未变，所以通过光具组的光束，仍然会聚于焦平面上的 Q 点（图 2－3(a)），但是这时光具组的像方焦点 F'已离开 Q 点．严格讲，回转后像的清晰度稍差．

2．回转轴未通过光具组的第二节点 N'

由于第二节点 N'未在回转轴上，所以光具组转动后，N'出现

移动，但由 N' 的出射光仍然平行于入射光，所以由 N' 出射的光线和前一情况相比将出现平移，光束的会聚点将从 Q 移到 Q'（图 2－3(b)）.（问：分析 Q' 相对 Q 的移动方向和远近，能判断 N' 在回转轴 O 的哪个方位吗？）

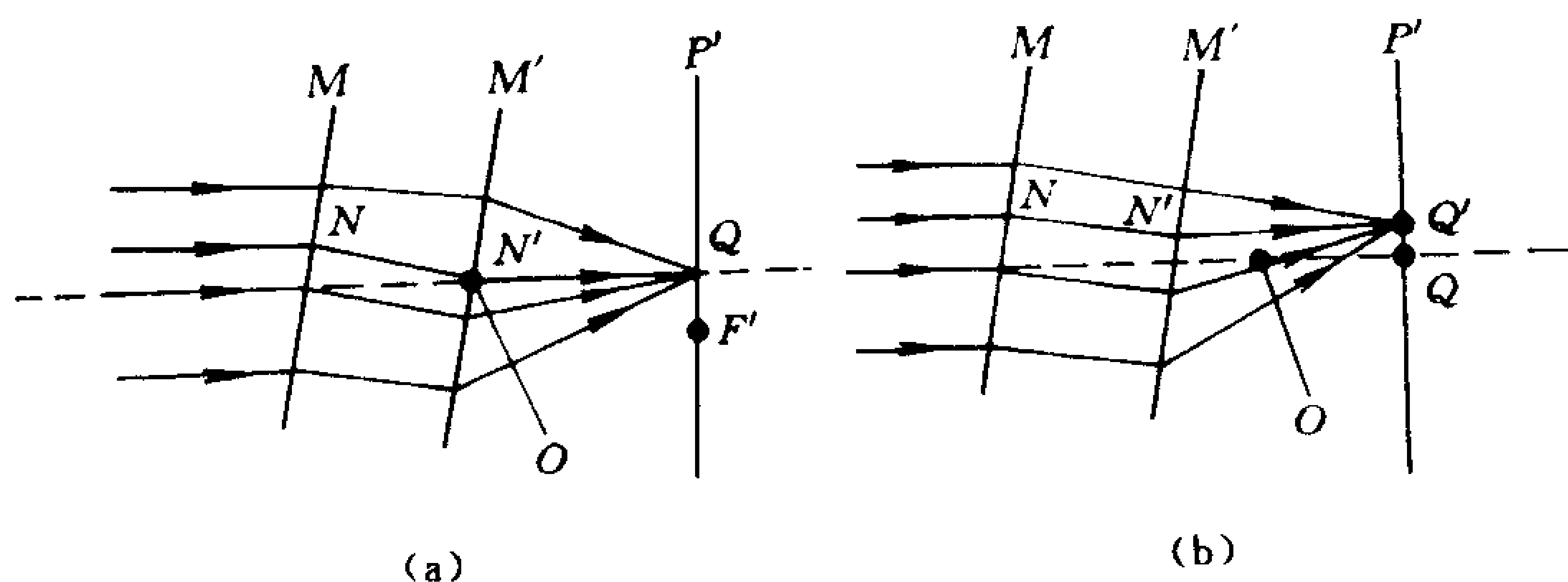


图 2－3

测节器是一个可绕铅直轴 OO' 转动的水平滑槽 R，待测基点的光具组 L_S（由薄透镜组成的共轴系统）可放置在滑槽上，位置可调，并由槽上的刻度尺指示 L_S 的位置（图 2－4）. 测量时轻轻地转动一点滑槽，观察白屏 P' 上的像是否移动，参照上述分析去判断 N' 是否位于 OO' 轴上，如果 N' 未在 OO' 轴上，就调整 L_S 在槽中位置，直至 N' 在 OO' 轴上，则从轴的位置可求出 N' 对 L_S 的位置.

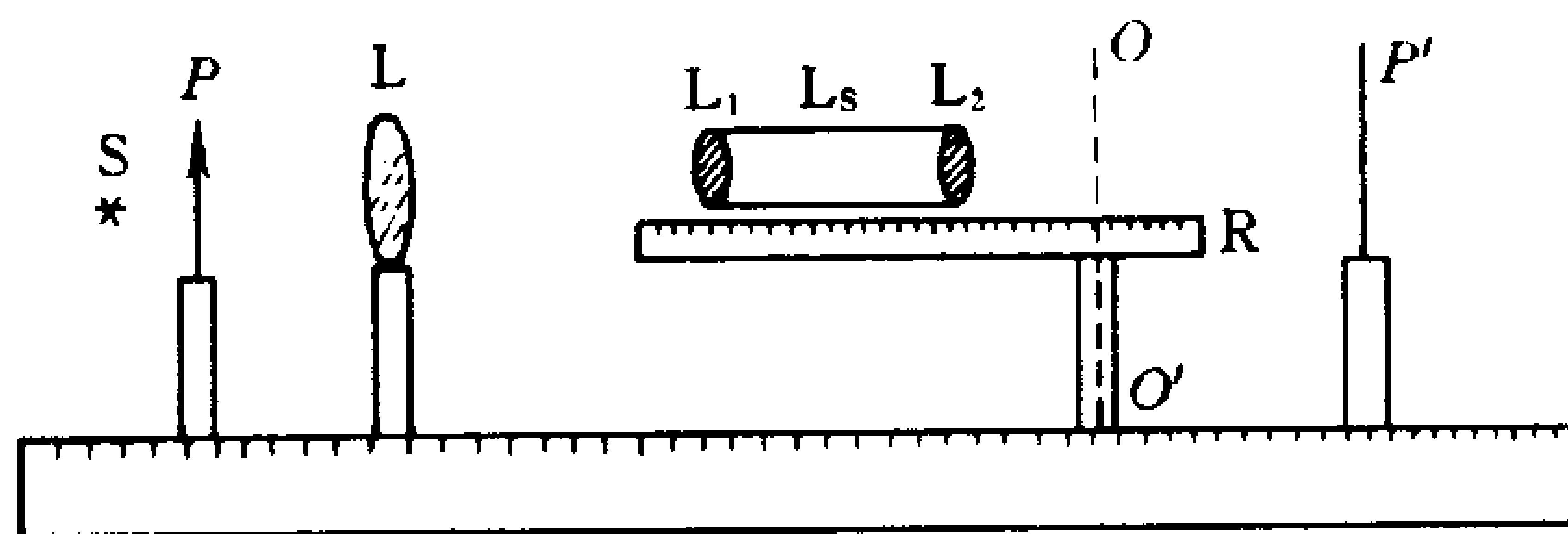


图 2－4

实验内容

1. 测量透镜 L_1 和 L_2 的焦距 f'_1、f'_2（L_1、L_2 为组成光具组的

二薄透镜),(参照实验一).

2. 将 L_1 和 L_2 按 $d<(f'_1+f'_2)$组合成光具组置于测节器的滑槽上.

3. 按图 2－4,将光源 S、物屏 P、准直物镜 L、测节器 R 及白屏 P'置于光具座上,调节共轴.

4. 用自准直方法调节物屏 P 位于准直物镜 L 的物方焦面上调好后 P 和 L 均不要移动.

5. 照亮物屏 P,移动白屏 P'得到清晰的像,轻轻少许转动滑槽,从像的移动判断 N'的位置,逐渐移动光具组 L_S,直至其第二节点 N'在转轴OO'上为止.(可用放大镜观察像).

记录 OO'轴和焦点F'相对于 L_2 的位置,重复几次.

6. 将光具组转 180°,此时原来的节点 N 成为N',同上测量.

7. 绘图表示光具组、主面及焦点的位置,计算焦距 f'之值.

8. 取 $d>(f'_1+f'_2)$,重复上述 5~7 的内容.

练习二　用牛顿成像公式测量光具组基点

仪器和用具

光具座,光具组(二薄凸透镜),平面反射镜,尖头棒(两个),T形辅助棒,物屏,白屏.

实验内容

1. 测量两凸透镜的焦距 f'_1和 f'_2(参照实验一).

2. 如图 2－5 布置仪器,取 $d<f'_1$及 $d<f'_2$组成光具组,调节共轴. 利用尖头棒 P 和平面镜 M,依据自准直方法确定光具组焦点 F 的位置,用 T 形辅助棒测出光具组最外侧镜面 A 到F 的距离l.

3. 将光具组转 180°,测量光具组 B 面前焦点 F' 的位置 l'（即 $\overline{BF'}$）.

4. 将尖头棒 P 置于物方焦点 F 的外侧,另一尖头棒 Q 置于像方焦点 F' 的外侧,照亮 P 棒,用视差法使 Q 棒和 P 的像对准,用 T 形棒测出 $\overline{PA}$、$\overline{BQ}$ 的距离 l_P 及 l_Q,则 $x = l_P - l$, $x' = l_Q - l'$,代入式(2-2)求焦距(要考虑 x、x' 的符号).

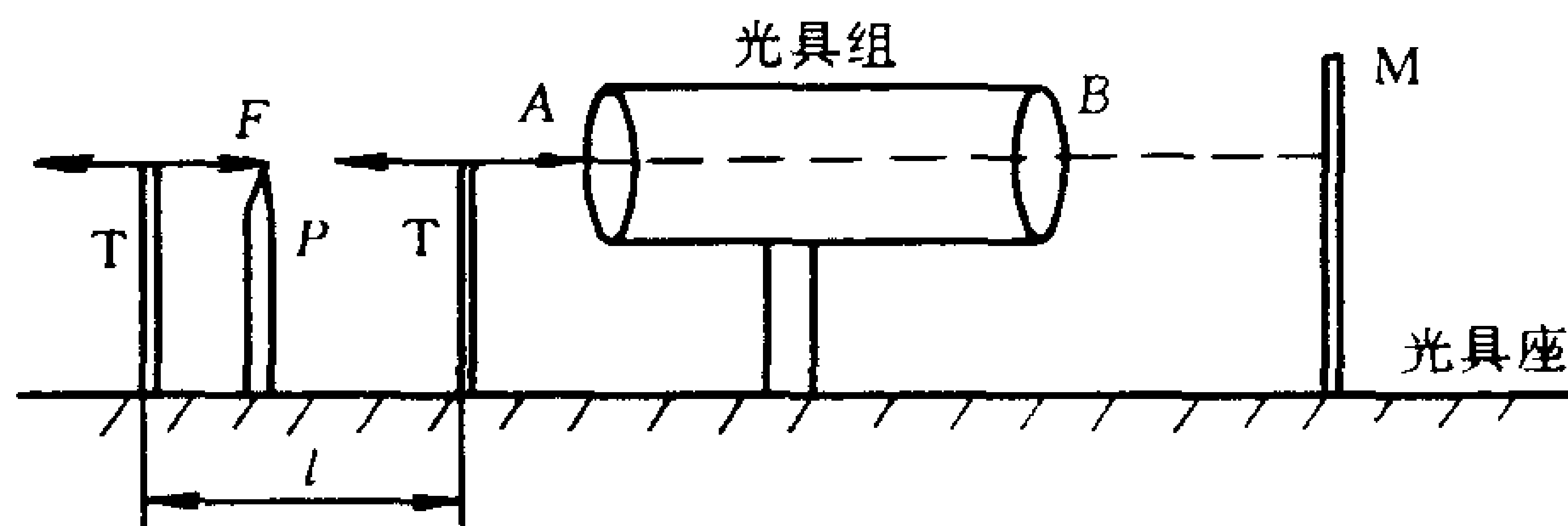


图 2-5

5. 求主面相对于 A、B 面的位置.

6. 将测量结果和由式(2-3)、(2-4)计算的结果进行比较.

7. 绘出光具组、焦点及主面的位置.

(问:如果取 $d < f'_1$、$d > f'_2$ 的光具组,进行上述测量有何困难? 如何解决?)

练习三　研究主面的特性

使用 $d > (f'_1 + f'_2)$ 的光具组,将物屏置于光具组第一主面处,用白屏在第二主面处观察像,考查像的大小与倒正.(问:使用 $d < (f'_1 + f'_2)$ 的光具组,进行主面特性的考查,有何困难? 如何设法解决?)

练习四　借助准直管(平行光管)测定显微目镜的基点

仪器和用具

CPG－550 型平行光管(准直管),显微目镜,移测显微镜,光具座.

原理

显微目镜的结构一般如图 2－6 所示,是惠更斯型目镜,它由场镜 L_1 和接目镜 L_2 构成,$f'_1>f'_2$. 二透镜距离为 d,且 $f'_1>d>f'_2$,由式(2－3)、(2－4)可知像方焦点 F' 为实焦点,物方焦点 F 为虚焦点.(问:设 $f'_1=3$ cm,$f'_2=1$cm,$d=2$ cm,如何绘出 F、F'、H、H' 的位置?)

此实验是借助准直管,测量显微目镜的焦点 F、F' 的位置及焦距 f',从而确定两主面的位置.

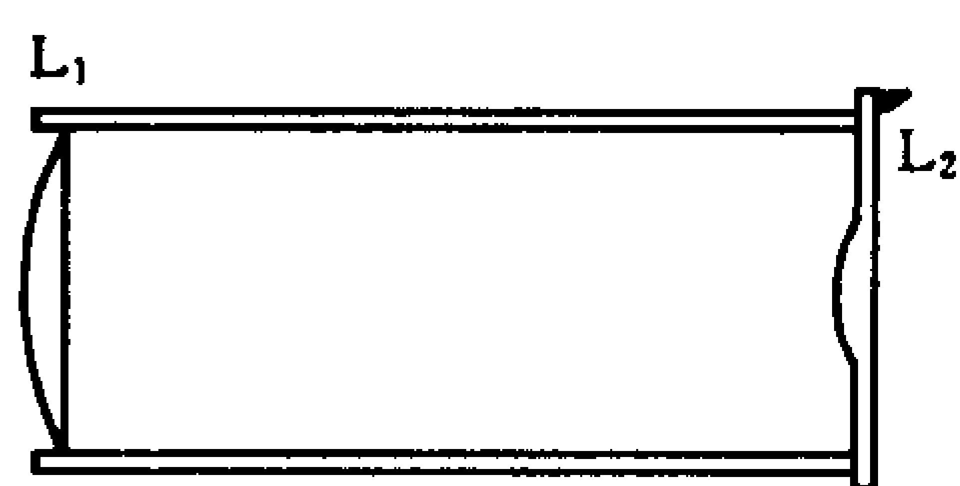


图 2－6

测量

1. 参照实验一练习二调节好准直管.

2. 如图 2－7 在光具座上安置仪器,并进行调节使整个系统共轴(如何判断?).

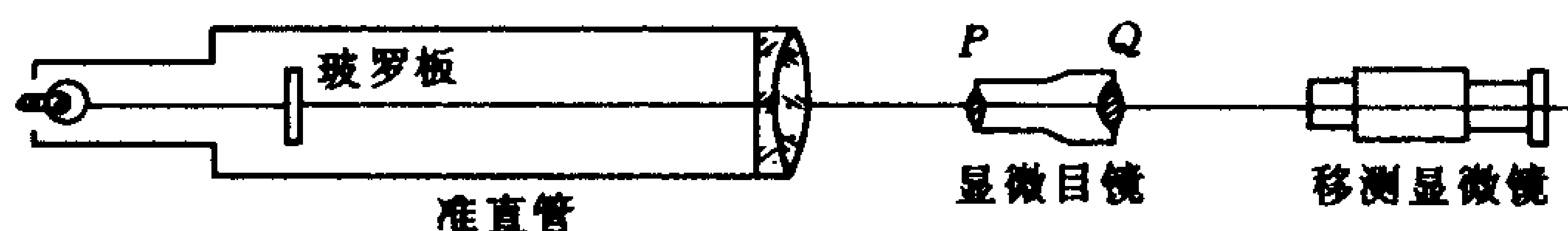


图 2－7

3. 测量显微目镜焦距 f'

以准直管的玻罗板为物，轴向移动目镜，直至从移测显微镜中看到玻罗板上刻线清晰的像，记录目镜的位置为 x_1，其次测出玻罗板上相距为 y 的二线间的像的间距为 y'，则

$$f' = f_0 \frac{y'}{y}（f_0 \text{ 为准直管物镜焦距}）$$

4. 测焦点 F' 的位置

将目镜移向移测显微镜，直至从显微镜中看清目镜上一端的标记 Q，再记录显微目镜的位置 x_2. 由 x_1 和 x_2 可以得知目镜焦点 F' 相对于标记 Q 的位置，结合 f' 可以确定主点 H' 相对于标记 Q 的位置.

又当测出标记 Q 到接目镜 L_2 的距离，则可确定 F'、H' 相对于 L_2 的位置.

测量 f' 的大小及 F' 的位置应重复几次.

5. 将显微目镜转 180°，参照对 F' 的测量，测量 F. 由于 $f = -f'$，因而可以由 F 的位置确定 H 的位置.

注意，F 为虚焦点，位置在 L_1、L_2 之间.

6. 绘图标出目镜基点的位置.

复习思考题

1. 第一主面靠近第一个透镜，第二主面靠近第二个透镜，在什么条件下才是对的？（光具组由二薄凸透镜组成）.

2. 由一凸透镜和一凹透镜组成的光具组，如何测量其基点？（距离 d 可自己设定）.

实验三　分光计的调节及棱镜玻璃折射率的测定

目的

1. 了解分光计的结构,掌握调节和使用分光计的方法;
2. 掌握测定棱镜角的方法;
3. 用最小偏向角法测定棱镜玻璃的折射率.

仪器和用具

分光计,钠灯,三棱镜.

实验内容

练习一　分光计的调节

JJY 型分光计的构造、调节和使用方法,在§3－4 中已有详尽的叙述,在实验前,必须进行认真仔细的阅读.

1. 按§3－4 内容将分光计的本体调节好,即应用自准直原理将望远镜对无穷远调焦,使望远镜的光轴垂直于仪器的主轴,使准直管产生平行光,并与望远镜共轴.

2. 调节待测光路平面与观察平面重合,即调节棱镜折射的主截面垂直于仪器的主轴.

(1) 待测棱镜的放置方法

将待测棱镜按图 3－1 所示的方法,放置在载物平台上,使折射面 AB 与平台调节螺钉 b_1、b_3 的连线相垂直. 这时调节螺钉 b_1 或 b_3,能改变 AB 面相对于主轴的倾斜度,而调节螺钉 b_2 对 AB 面的倾斜度不产生影响.

(2) 调节三棱镜的主截面垂直于仪器的主轴

三棱镜的棱镜角 A 是棱镜主截面上三角形两边之间的夹角．应用分光计测量时，必须使待测光路平面与棱镜的主截面一致．由于分光计的观察平面已调节好并垂直于仪器的主轴，因此棱镜的主截面也应垂直于仪器的主轴．即调节三棱镜的两个折射面 AB 和 AC，使之均能垂直于望远镜的光轴．

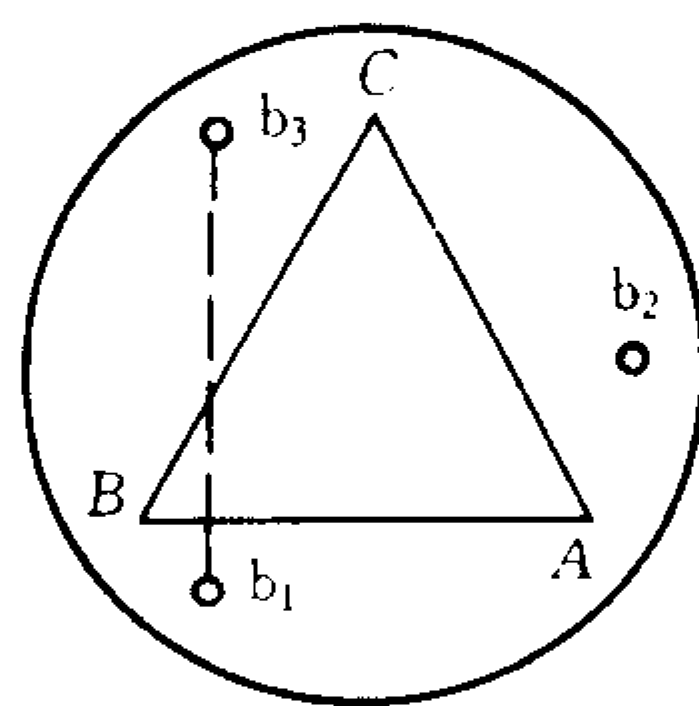


图 3－1

调节的方法是先用望远镜对准棱镜的 AB 面，细调螺钉 b_1 或 b_3，使望远镜目镜视场中能看见清晰的叉丝反射像，并和调整叉丝重合，如图 0－3－14(b)所示．旋转棱镜台，再将棱镜的 AC 面对准望远镜，微调螺钉 b_2，又可见十字叉丝的反射像呈现在视场中．在一般情况下，视场中的两对叉丝在垂直方向上将不再重合．依照二分之一调节法，重复进行调节，直至无论望远镜对准棱镜的 AB 面或 AC 面时，十字叉丝的反射像均能和调整叉丝无视差地重合，此时，棱镜的主截面才和仪器的主轴相垂直．至此，分光计测量前的准备工作已全部调节完成．

注意，调节后的分光计在使用中，不要破坏已调好的条件；又分光计上可调螺钉较多，要明确它们的作用．

练习二　棱镜角的测量

参照下述方法之一进行测量

1. 自准直法

将待测棱镜置于棱镜台上．固定望远镜，点亮小灯照亮目镜中的叉丝，旋转棱镜台，使棱镜的一个折射面对准望远镜，用自准直法调节望远镜的光轴与此折射面严格垂直，即使十字叉丝的反射像和调整叉丝完全重合．如图 3－2 所示．记录刻度盘上两游标

读数 v_1, v_2；再转动游标盘联带载物平台，依同样方法使望远镜光轴垂直于棱镜第二个折射面，记录相应的游标读数 v'_1, v'_2；同一游标两次读数之差等于棱镜角 A 的补角 θ：

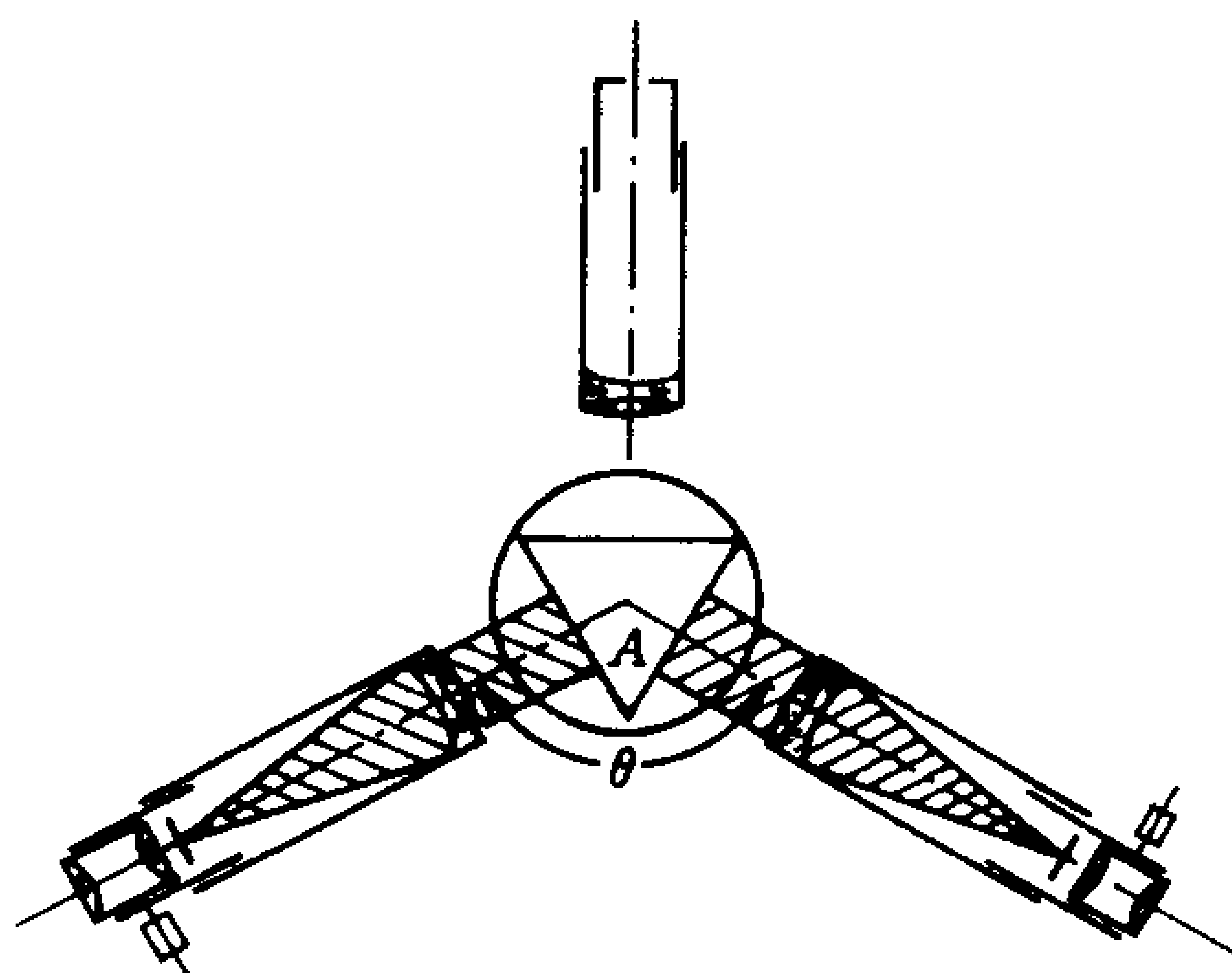


图 3-2

$$\theta = \frac{1}{2}[(v'_2 - v_2) + (v'_1 - v_1)]$$

即棱镜角 $A = 180° - \theta$. 重复测量几次，计算棱镜角 A 的平均值和标准不确定度.

2. 棱脊分束法

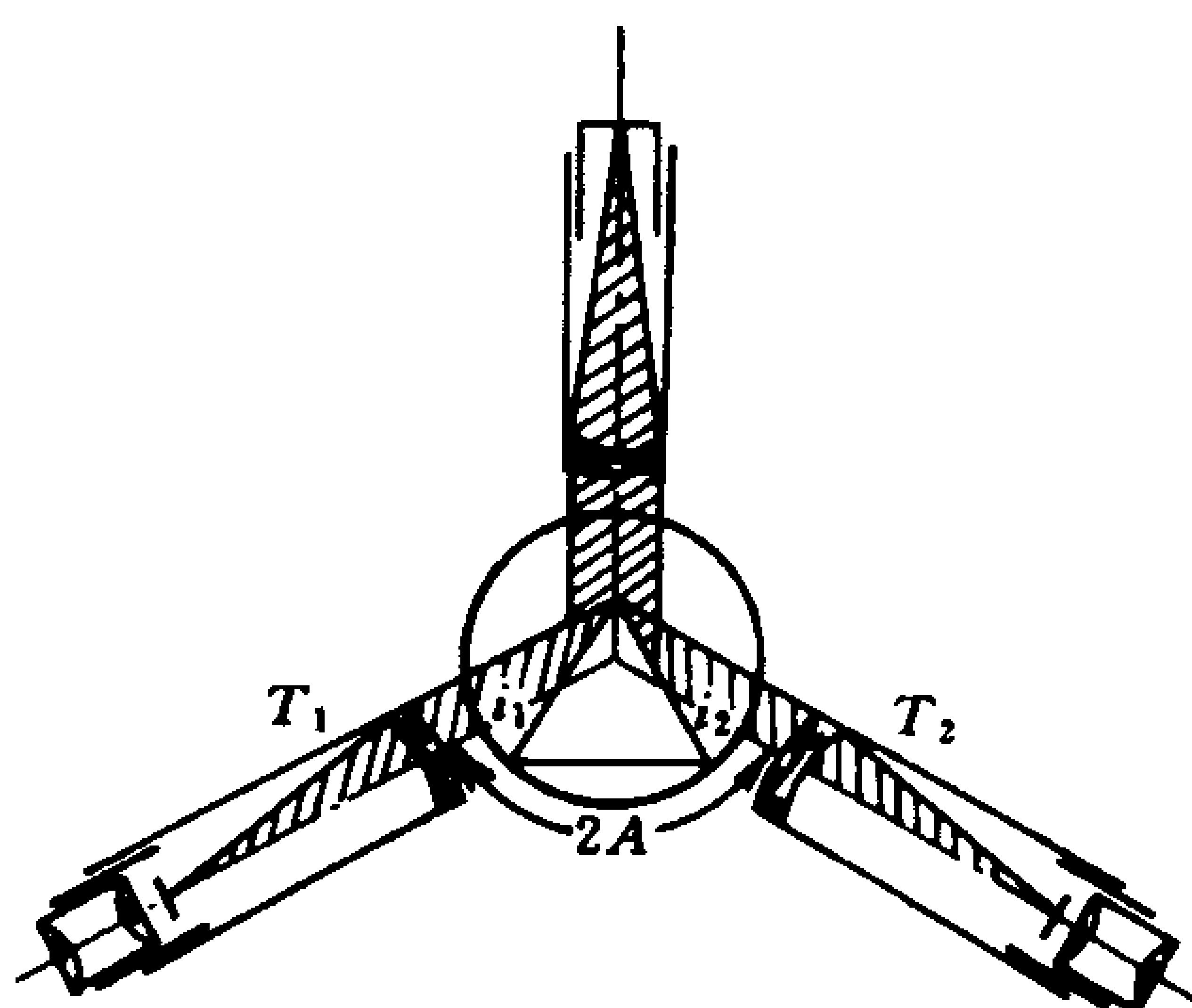


图 3-3

置光源于准直管的狭缝前，将待测棱镜的折射棱对准准直管，如图3－3所示，由准直管射出的平行光束被棱镜的两个折射面分成两部分. 固定分光计上的其余可动部分，转动望远镜至 T_1 位置，观察由棱镜的一折射面所反射的狭缝像，使之与竖直叉丝重合；将望远镜再转至 T_2 位置，观察由棱镜另一折射面所反射的狭缝像，再使之与竖直叉丝重合，望远镜的两位置所对应的游标读数之差，为棱镜角 A 的两倍.

注意：在测量时，应将三棱镜的折射棱靠近棱镜台的中心放置，否则由棱镜两折射面所反射的光将不能进入望远镜.

练习三　棱镜玻璃折射率的测定

原理

棱镜玻璃的折射率，可用测定最小偏向角的方法求得. 如图3－4所示，光线 PO 经待测棱镜的两次折射后，沿 $O'P'$ 方向射出时产生的偏向角为 δ. 在入射光线和出射光线处于光路对称的情况下，即 $i_1 = i'_2$，偏向角为最小，记为 δ_m. 可以证明：棱镜玻璃的折射率 n 与棱镜角 A、最小偏向角 δ_m 有如下关系：

$$n = \frac{\sin \frac{A + \delta_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \tag{3-1}$$

因此，只要测出 A 与 δ_m 就可从式(3－1)求得折射率 n.

由于透明材料的折射率是光波波长的函数，同一棱镜对不同波长的光具有不同的折射率. 所以当复色光经棱镜折射后，不同波长的光将产生不同的偏向而被分散开来. 通常棱镜的折射率是对钠光波长 589.3 nm 而言.

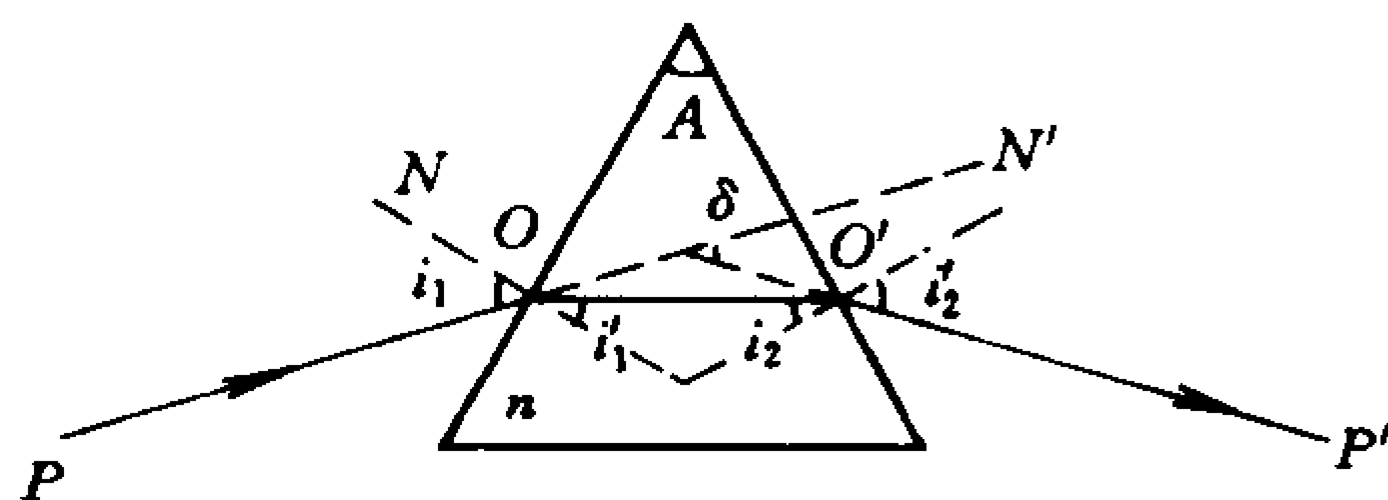


图 3－4

测量

1. 用钠灯照亮狭缝，使准直管射出平行光束.

2. 测定最小偏向角

(1) 将待测棱镜按图 3－5 所示放置在棱镜台上，转动望远镜至 T_1 位置，便能清楚地看见钠光经棱镜折射后形成的黄色谱线.

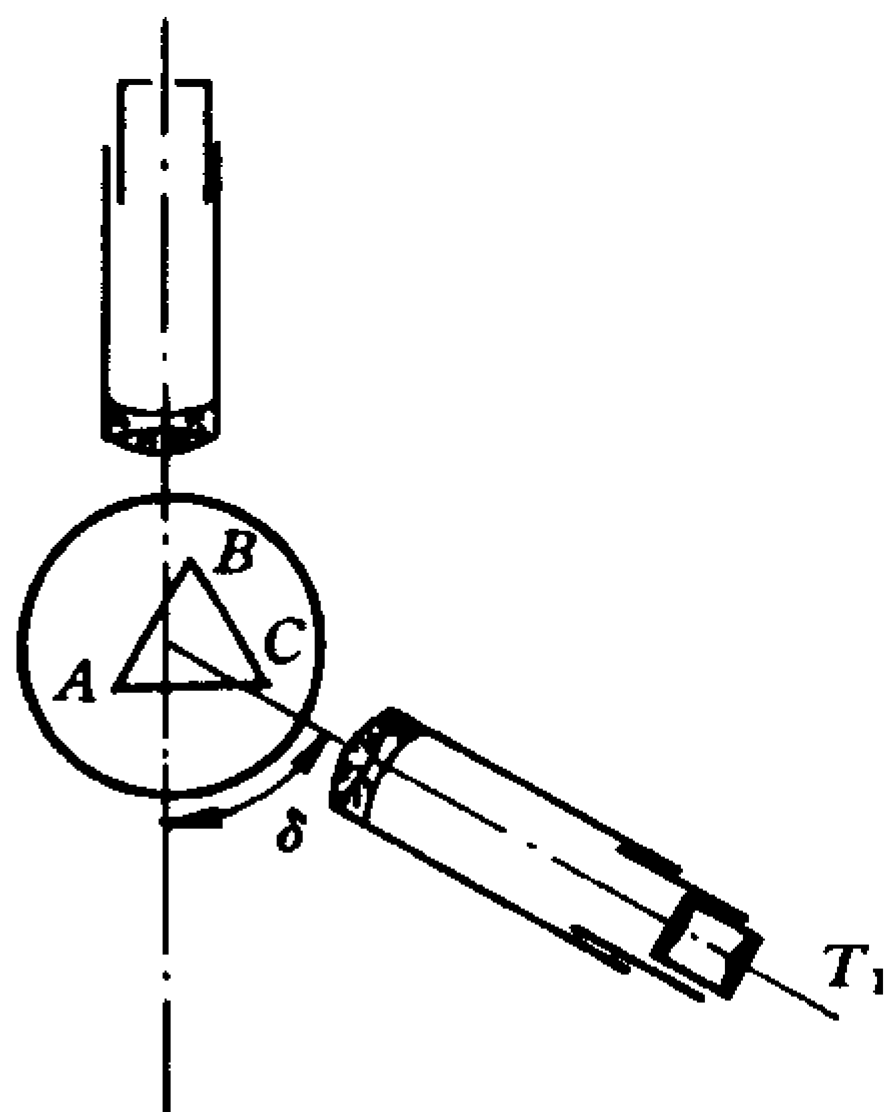


图 3－5

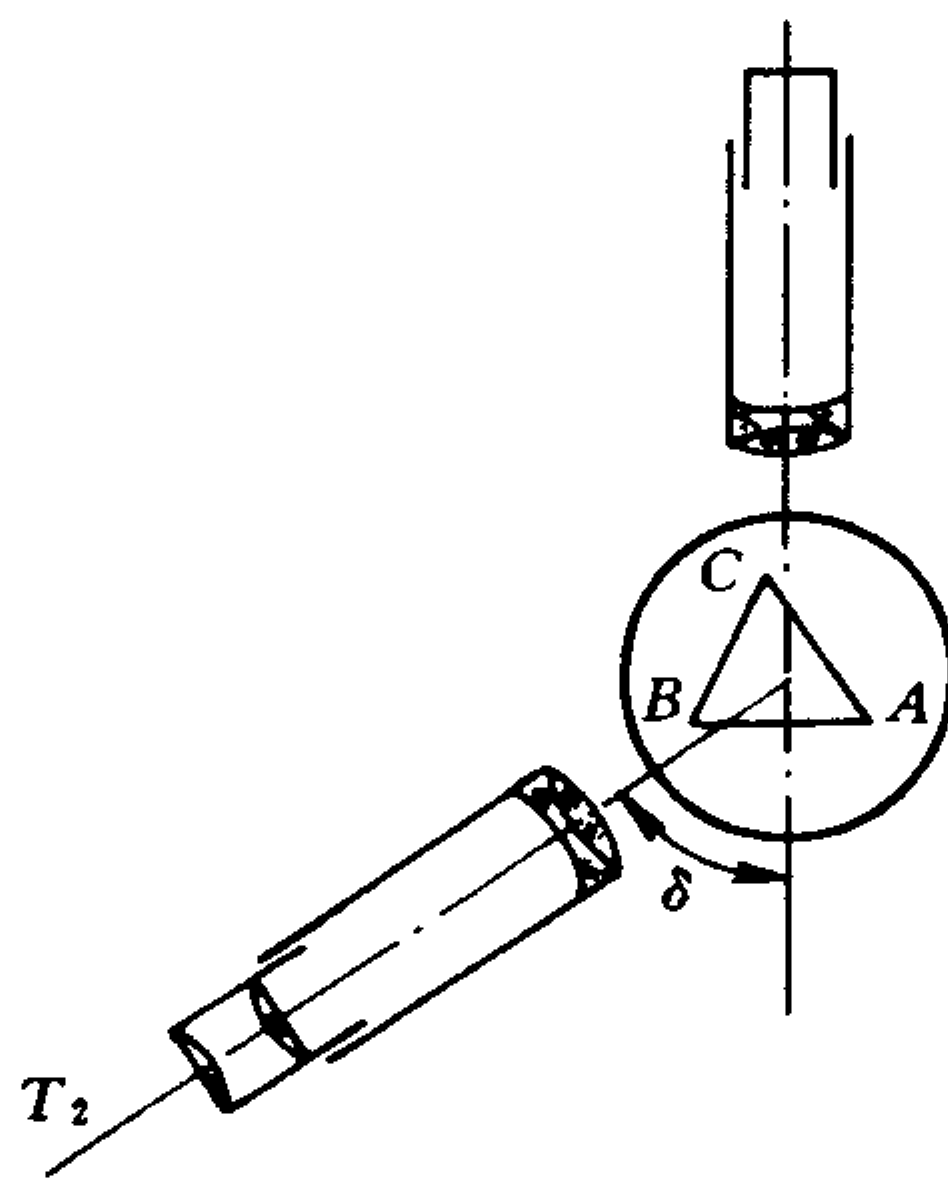


图 3－6

(2) 将刻度内盘（游标盘）固定. 慢慢转动棱镜台，改变入射角 i_1，使谱线往偏向角减小的方向移动，同时转动望远镜跟踪该谱线.

(3) 当棱镜台转到某一位置，该谱线不再移动，这时无论棱镜台向何方向转动，该谱线均向相反方向移动，即偏向角都变大. 这个

谱线反向移动的极限位置就是棱镜对该谱线的最小偏向角的位置.

(4) 左右慢慢转动棱镜台,同时操纵望远镜微动装置,使竖直叉丝对准黄色谱线的极限位置(中心),记录望远镜在 T_1 位置的刻度盘读数 v_1、v_2.

(5) 将棱镜转到对称位置(图 3-6),使光线向另一侧偏转,同上寻找黄色谱线的极限位置,相应的游标读数为 v'_1 和 v'_2.

同一游标左、右两次数值之差 $|v'_1 - v_1|$、$|v'_2 - v_2|$ 是最小偏向角的 2 倍,即

$$\delta_m = (|v'_1 - v_1| + |v'_2 - v_2|)/4$$

3. 用测得的顶角 A 及最小偏向角 δ_m 计算棱镜玻璃的折射率 n 及不确定度.

注意有关表示角度误差的数值要以弧度为单位.

复习思考题

设计一种不测最小偏向角而能测棱镜玻璃折射率的方案(使用分光计去测).

[附记]

式(3-1)的证明. 由图 3-4 可知

$$\frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = n, \qquad \frac{\sin i'_2}{\sin i_2} = n$$

$\delta = i_1 - i'_1 + i'_2 - i_2 = i_1 + i'_2 - A$, $A = i'_1 + i_2$,由上式求出 i_1 和 i'_2

$$i_1 = \arcsin(n\sin i'_1), i'_2 = \arcsin[n\sin(A - i'_1)]$$

则 $$\delta = \arcsin(n\sin i'_1) + \arcsin[n\sin(A - i'_1)] - A$$

当 $$\frac{d\delta}{di'_1} = \frac{n\cos i'_1}{\sqrt{1 - n^2\sin^2 i'_1}} - \frac{n\cos(A - i'_1)}{\sqrt{1 - n^2\sin^2(A - i'_1)}} = 0$$

时 δ 取极小值 δ_m,亦即对于 δ_m,必定 $i'_1 = A - i'_1$,则 $i'_1 = A/2$,

又从光的可逆性考虑,亦当成立 $i_2 = A/2$,因而成立 $i'_1 = i_2$, $i_1 = i'_2$.则 $i_1 = (A + \delta_m)/2$,所以

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = \frac{\sin \frac{A + \delta_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \qquad \text{(证毕)}$$

实验四　用掠入射法测定透明介质的折射率

目的

1. 掌握用掠入射法测定液体的折射率；
2. 了解阿贝折射计的工作原理,并熟悉其使用方法.

实验内容

练习一　用掠入射法测定液体折射率

仪器和用具

分光计,三棱镜(两块),单色光源(钠灯),待测液体(水、酒精),读数小灯,毛玻璃屏.

原理

将折射率为 n 的待测物质放在已知折射率为 n_1 的直角棱镜的折射面 AB 上,且 $n < n_1$. 若以单色的扩展光源照射分界面 AB 时,则从图 4－1 可以看出:入射角为 $\pi/2$ 的光线Ⅰ将掠射到 AB 界面而折射进入三棱镜内. 显然,其折射角 i_c 应为临界角,因而满足关系式

$$\sin i_c = \frac{n}{n_1} \tag{4-1}$$

当光线Ⅰ射到 AC 面,再经折射而进入空气时,设在 AC 面上的入射角为 ψ,折射角为 φ,则有

$$\sin\varphi = n_1 \sin\psi \tag{4-2}$$

除掠入射光线Ⅰ外,其他光线例如光线Ⅱ在 AB 面上的入射角均

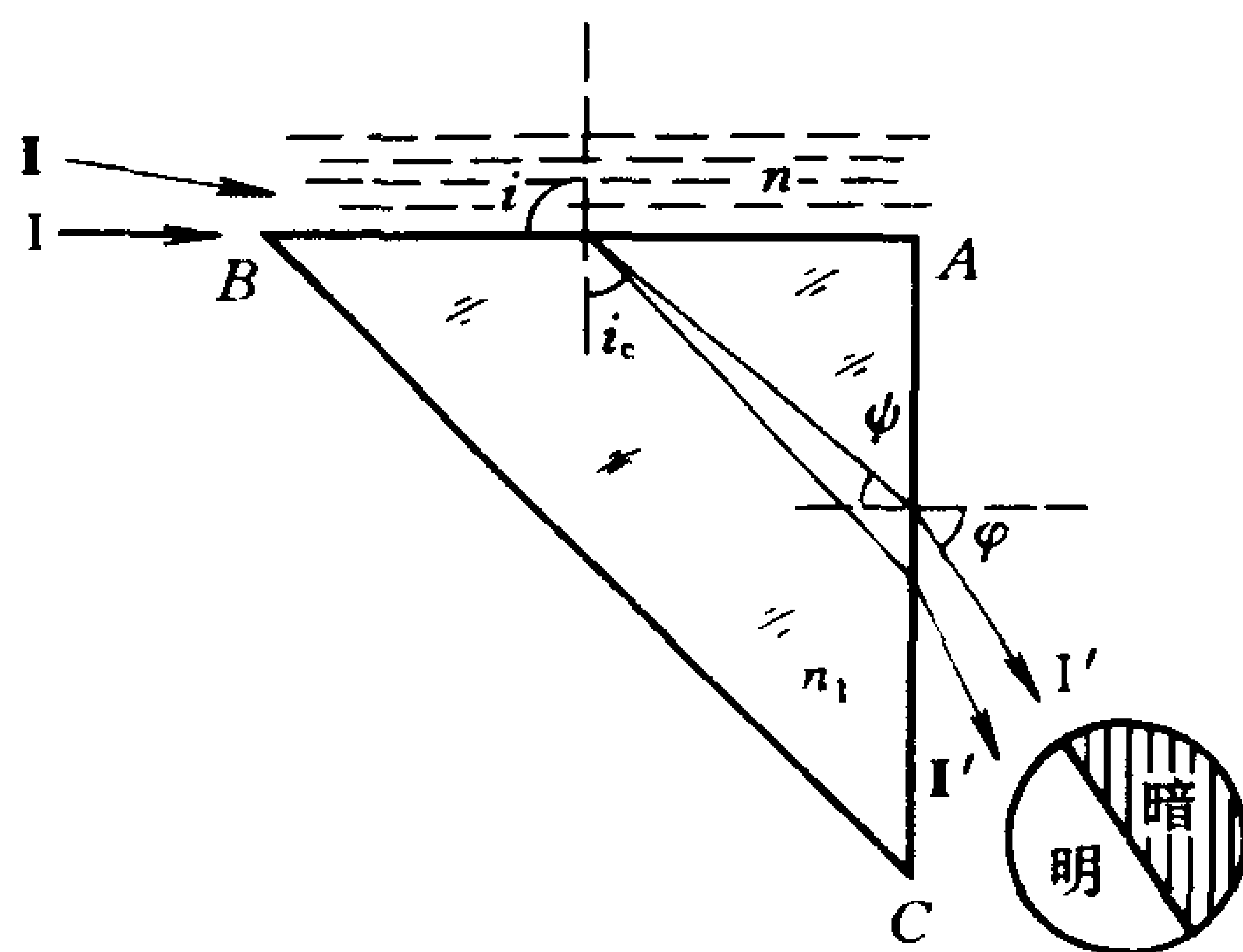


图 4－1

小于 π/2,因此经三棱镜折射最后进入空气时,都在光线Ⅰ′的左侧. 当用望远镜对准出射光方向观察时,视场中将看到以光线Ⅰ′为分界线的明暗半荫视场,如图 4－1 所示.

由图 4－2 可以看出,当三棱镜的棱镜角 A 大于角 i_c 时,A、i_c 和角 ψ 有如下关系

$$A = i_c + \psi \tag{4-3}$$

由式(4－1)、式(4－2)和式(4－3)消去 i_c 和 ψ 后可得

$$n = \sin A\sqrt{n_1^2 - \sin^2\varphi} - \cos A \cdot \sin\varphi \tag{4-4}$$

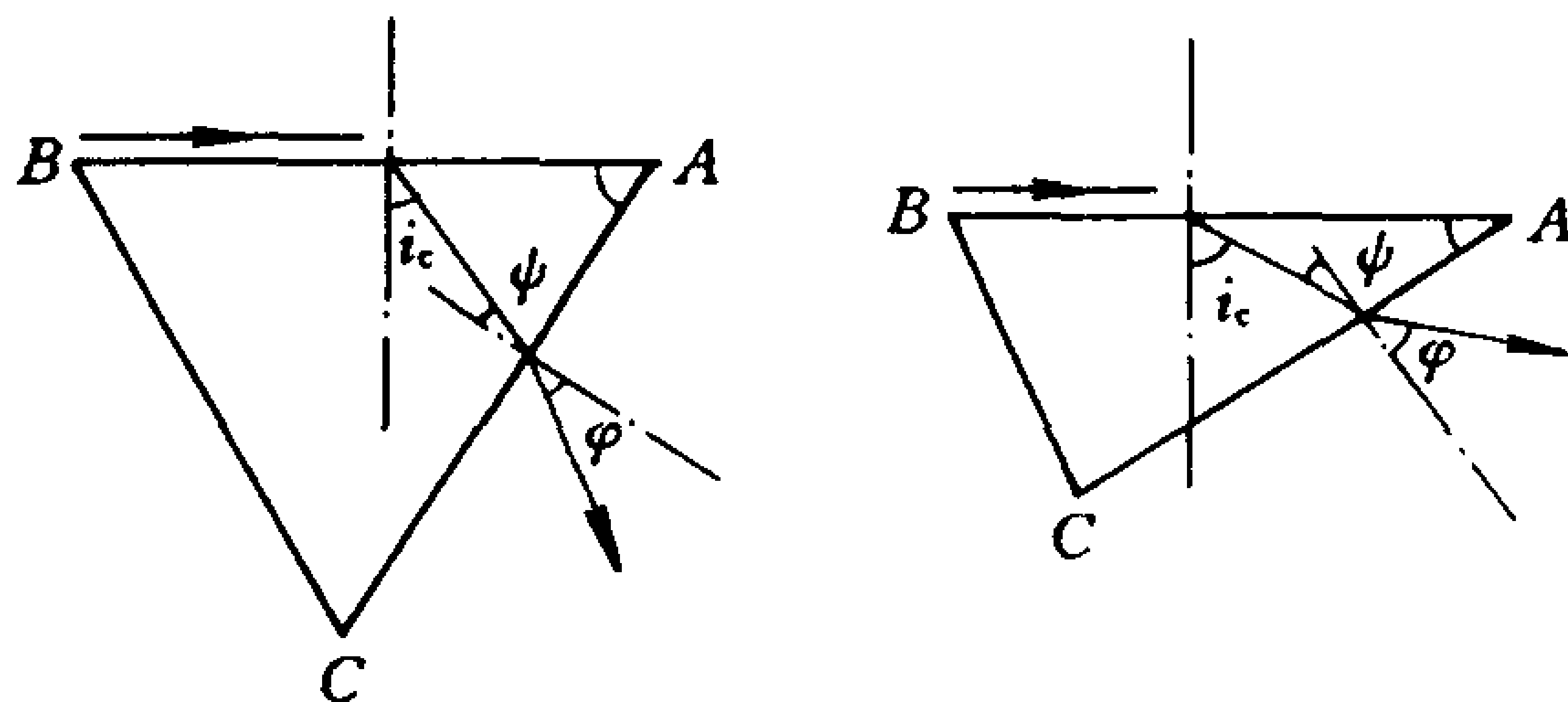


图 4－2

如果棱镜角 $A = 90°$,则上式简化为

$$n = \sqrt{n_1^2 - \sin^2\varphi} \tag{4-5}$$

因此,当直角棱镜的折射率 n_1 为已知时,测出 φ 角后即可计算出待测物质的折射率 n. 上述测定折射率的方法称为掠入射法,是基于全反射原理.(问:如果 $A < i_c$ 时,式(4-3)、(4-4)将有何变化? 观察的现象有何变化?)

测量

1. 按实验三有关内容将分光计调节好. 即应用自准直方法将望远镜对无穷远调焦,并使其光轴垂直于仪器的转轴;调节棱镜的主截面也和仪器的转轴垂直.

2. 按图 4-3 所示,将待测液体滴一二滴在直角棱镜的 AB 面上,用 90°角作为棱镜顶角(A),并用另一辅助棱镜 $A'B'C'$ 之一个表面 $A'B'$ 与 AB 面相合,使液体在两棱镜接触面间形成一均匀液层,然后置于分光计棱镜台上.(注意棱镜 ABC 的放置方法).(问:可否不用辅助棱镜?)

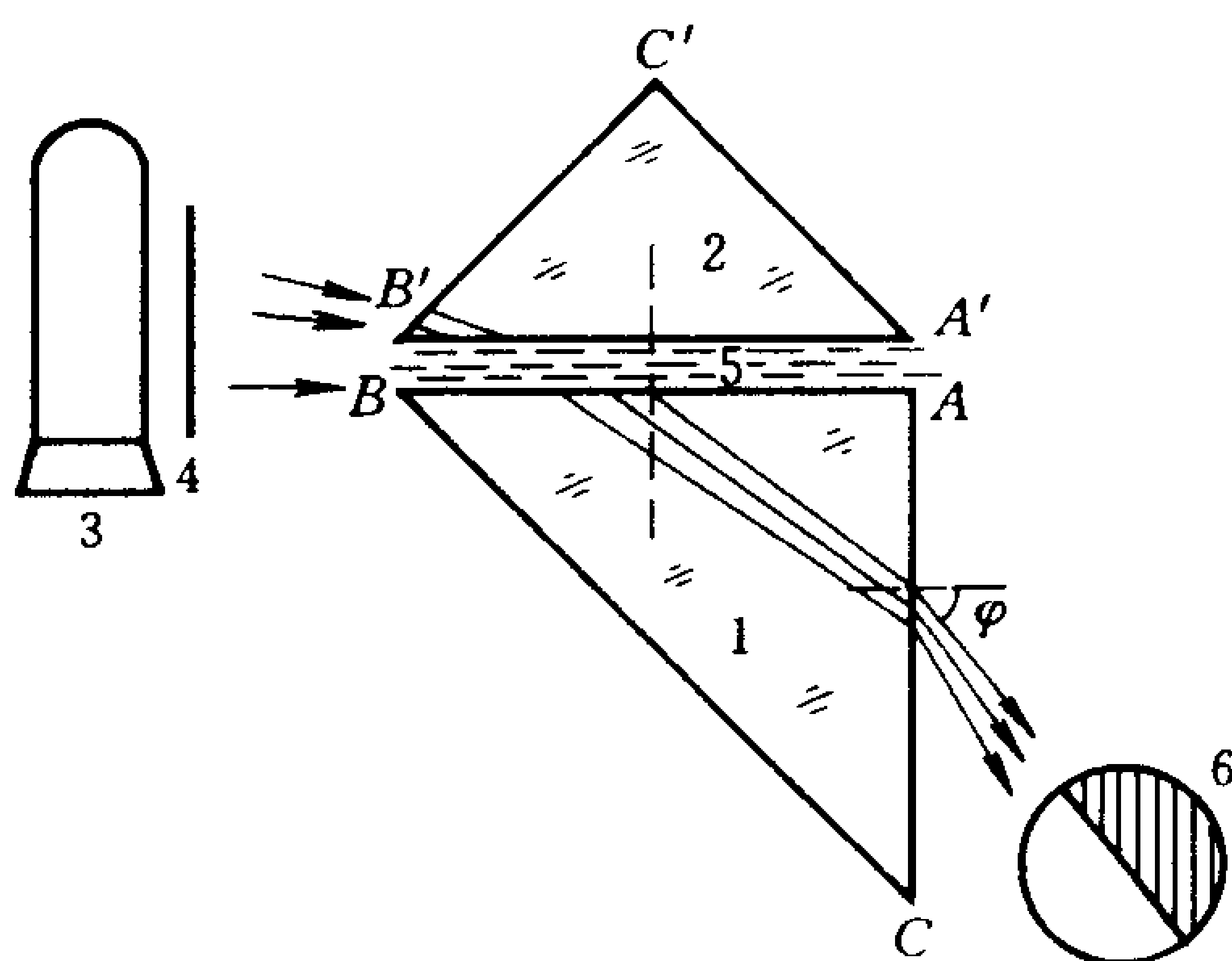


图 4-3

1. 直角棱镜;2. 辅助棱镜;3. 钠灯;4. 毛玻璃屏;
5. 待测液体薄膜;6. 用望远镜观察到的半荫视场

3. 点亮钠灯照亮毛玻璃屏,将它放在折射棱 B 的附近,先用

眼睛在出射光的方向观察半荫视场. 旋转棱镜台,改变光源和棱镜的相对方位,使半荫视场的分界线位于棱镜台近中心处,将棱镜台固定. 转动望远镜,使望远镜叉丝对准分界线,记下两游标读数(v_1, v_2),重复测量几次,取其平均值.

4. 再次转动望远镜,利用自准直的调节方法,测出 AC 面的法线方向(即使望远镜的光轴垂直于 AC 面),记下两游标读数(v'_1、v'_2). 重复测量几次,取其平均值. 由此可得

$$\varphi = \frac{1}{2}[(v'_1 - v_1) + (v'_2 - v_2)]$$

5. 将 φ 值代入式(4-5),即得

$$n = \sqrt{n_1^2 - \sin^2\varphi}$$

如果棱镜角 $A \neq 90°$,则须将 φ 值代入式(4-4)计算 n.

6. 依同样方法,重复以上步骤,测定另一种液体的折射率.

注意事项

1. 注意审查看到的现象是否准确?(如何判断?)

2. 辅助棱镜 $A'B'C'$ 的作用是让较多的光线能投射到液层和折射棱镜的 AB 面上,使观察到的分界线更为清楚. 两棱镜之间的液层一定要均匀,不能含有气泡. 滴入液体不宜过多,避免大量渗漏在仪器上.

3. 当改换另一种被测液体时,必须将棱镜擦拭干净.

练习二　用阿贝折射计测定透明介质的折射率

原理与仪器描述

阿贝折射计是测量固体和液体折射率的常用仪器,测量范围为 1.3~1.7,可以直接读出折射率数值,操作简便,测量比较准确(精度为 0.0003),还可测量不同温度时的折射率. 测量液体时所

需样品很少,测量固体时对样品的加工要求不高.

阿贝折射计也是根据全反射原理设计的.它有两种工作方式,即透射式和反射式.阿贝折射计中的折射棱镜 ABC 和照明棱镜 $A'B'C'$ 都是直角棱镜,由重火石玻璃制成.照明棱镜的 $A'B'$ 面经过磨砂,使透射式测量作漫射光源用.折射棱镜的 BC 面也经过磨砂,供反射式测量作漫射光源用.

透射式测量光路如图 4-4(a)所示.将折射率为 n 的待测物质放在折射率为 n_1 的直角棱镜的斜面上,其棱角为 A,并用光源 S照明之.如果介质的折射率 $n < n_1$,与图 4-1 相同,经棱镜 ABC 两次折射后,由 AC 面射出的光束,在望远镜视场中将观察到半荫视场,明暗分界线就对应于掠面入射光束,测出 AC 面上相应的临界出射角 φ,即可应用式(4-4)计算.

应用阿贝折射计测定固体折射率时,不用照明棱镜.对于加工有两个抛光面的固体样品,测量光路可采用如图 4-4(b)所示的透射式测量,对于加工只有一个抛光面的固体样品,则可采用图 4-4(c)所示的反射式测量.

用光源 S(一般为自然光)照亮折射棱镜上的磨砂面 BC,使之成为一个扩展的平面光源,从面上各点发出的光线Ⅰ、Ⅱ射抵 AB 面上的 E 点时,入射角均不相同.其中入射角大于临界角 i_c 的,都发生全反射后再由 AC 面射出,同样,在望远镜对准Ⅰ′观察时,亦可看到半荫视场,只是明暗分布恰与透射光的视场分布相反,其临界出射角 φ 当为最大,而且视场中明暗的对比也不如透射光明显,这是由于照射在 AB 面上那些小于临界角的光线,也会在 AB 面上产生部分的反射.测出 AC 面上的临界出射角 φ,仍可代入式(4-4),计算待测固体的折射率.

测定时,将待测样品的抛光面与折射棱镜 AB 面紧密地叠合在一起,中间添加一层接触液,形成均匀的液膜,其折射率应大于样品的折射率(例如 α-溴代萘,$n_D = 1.66$),当样品折射率大于 1.66 时,可用二碘甲烷($n_D = 1.74$)进行测量,可以证明接触液的

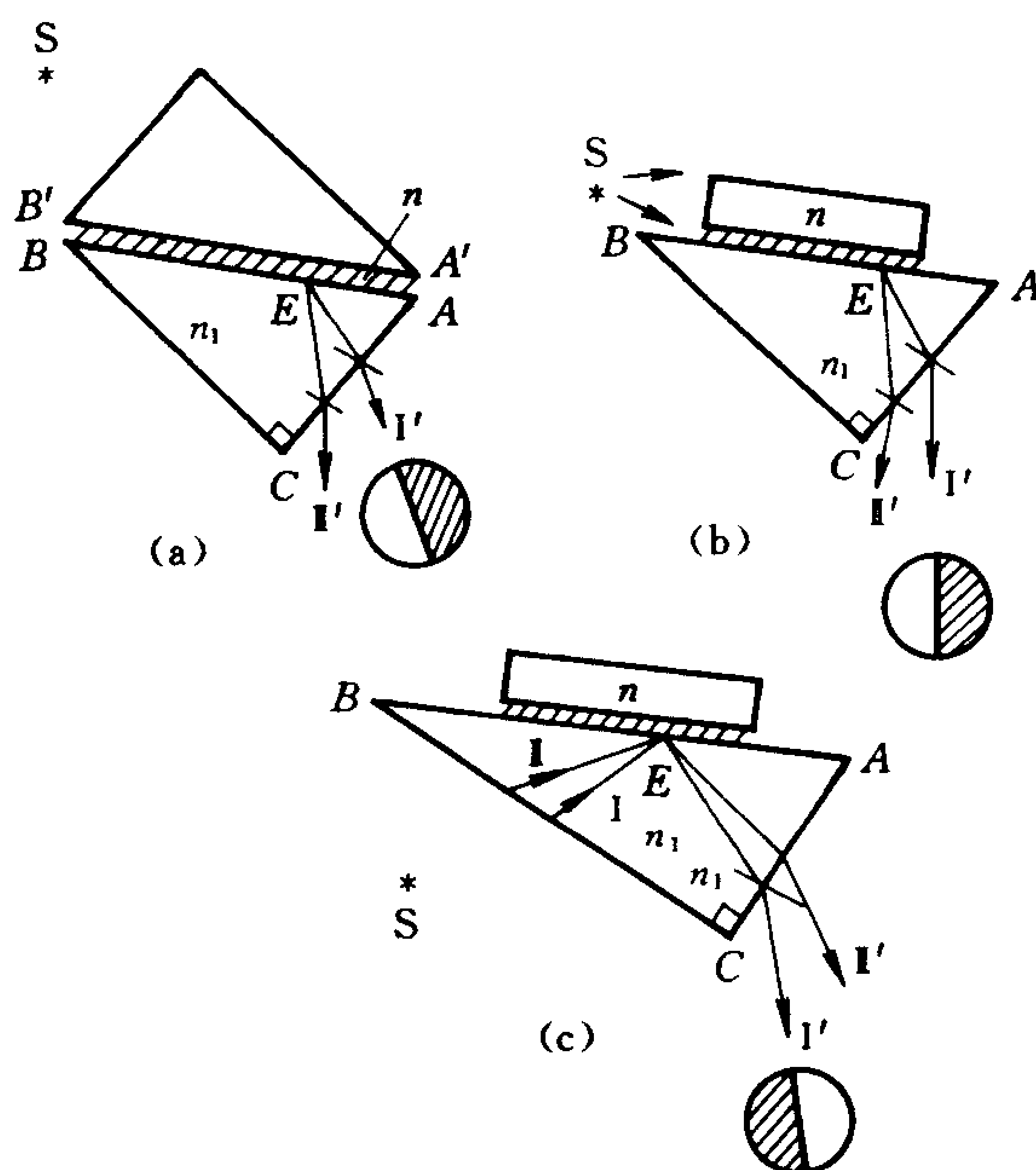


图 4－4

加入，并不影响计算公式(4－4)的适用性.

阿贝折射计的光学系统由两部分组成：望远系统与读数系统(图 4－5).

望远系统：光线经反射镜(1)反射进入照明棱镜(2)及折射棱镜(3)，待测液体放置在棱镜(2)与(3)之间，经阿米西(Amice)消色差棱镜组(4)以抵消由于折射棱镜与待测物质所产生的色散，通过物镜(5)将明暗分界线成像于分划板(6)上，再经目镜(7)、(8)放大成像后为观察者所观察.

阿米西消色差棱镜组由两个完全相同的直视棱镜组成，每一个直视棱镜又由三个分光棱镜复合而成. 棱镜Ⅰ和Ⅲ的介质相同，与棱镜Ⅱ互为倒置，并使钠黄光(D 线)能无偏向地通过，但对波长较长的红光(C 线)、波长较短的紫光(F 线)，因复合棱镜的色

散，将产生相应的偏折，其主截面如图 4－6 所示. 消色差棱镜组通过一个公用的旋钮调节，使之绕望远镜的光轴沿相反方向同时转动. 转动的角度可从读数盘上读出. 在平行于阿贝折射棱镜的主截面内，产生一个随转动角度改变的色散，色散的方向和数值的大小均可变化，以抵消由于折射棱镜和待测样品产生的色散，使观察

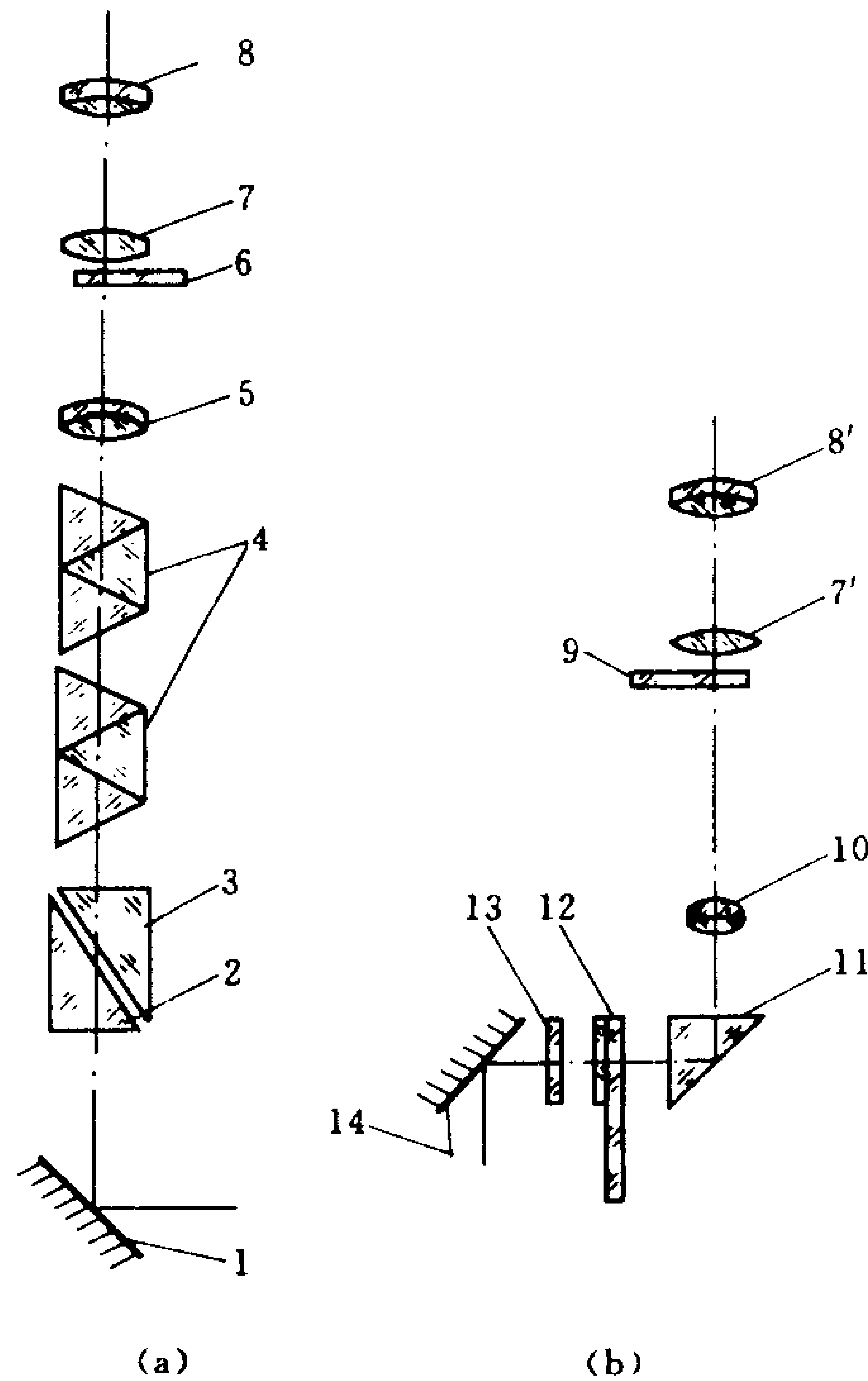


图 4－5

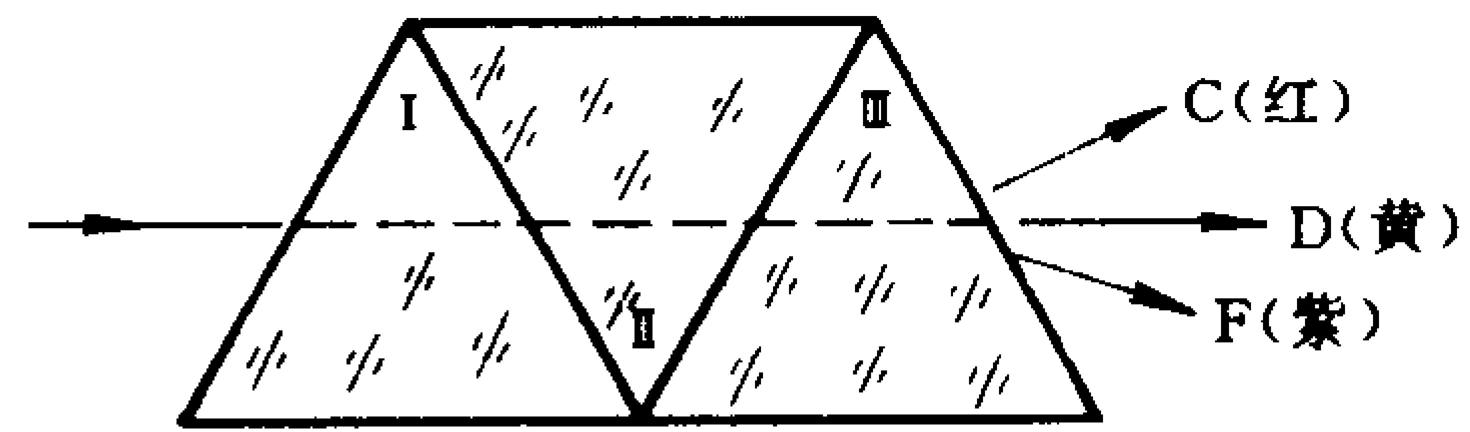


图 4－6

的半荫视场清晰、界线分明. 从消色差棱镜组转动的角度，对照仪器的附表，便可查知样品的平均色散 $n_F - n_C$.

读数系统：光线由小反光镜(14)经毛玻璃(13)照明刻度盘(12)，经转向棱镜(11)及物镜(10)将刻度成像于分划板(9)上，再经目镜(7′)、(8′)放大成像后为观察者所观察.

国产 WYA 型阿贝折射计的外形如图 4－7 所示，图中(11)为阿贝棱镜组，下面的棱镜为辅助照明棱镜，上面的棱镜为折射棱镜，它们整个连结在一个可以旋转的臂上. 当旋转手轮(2)时，棱

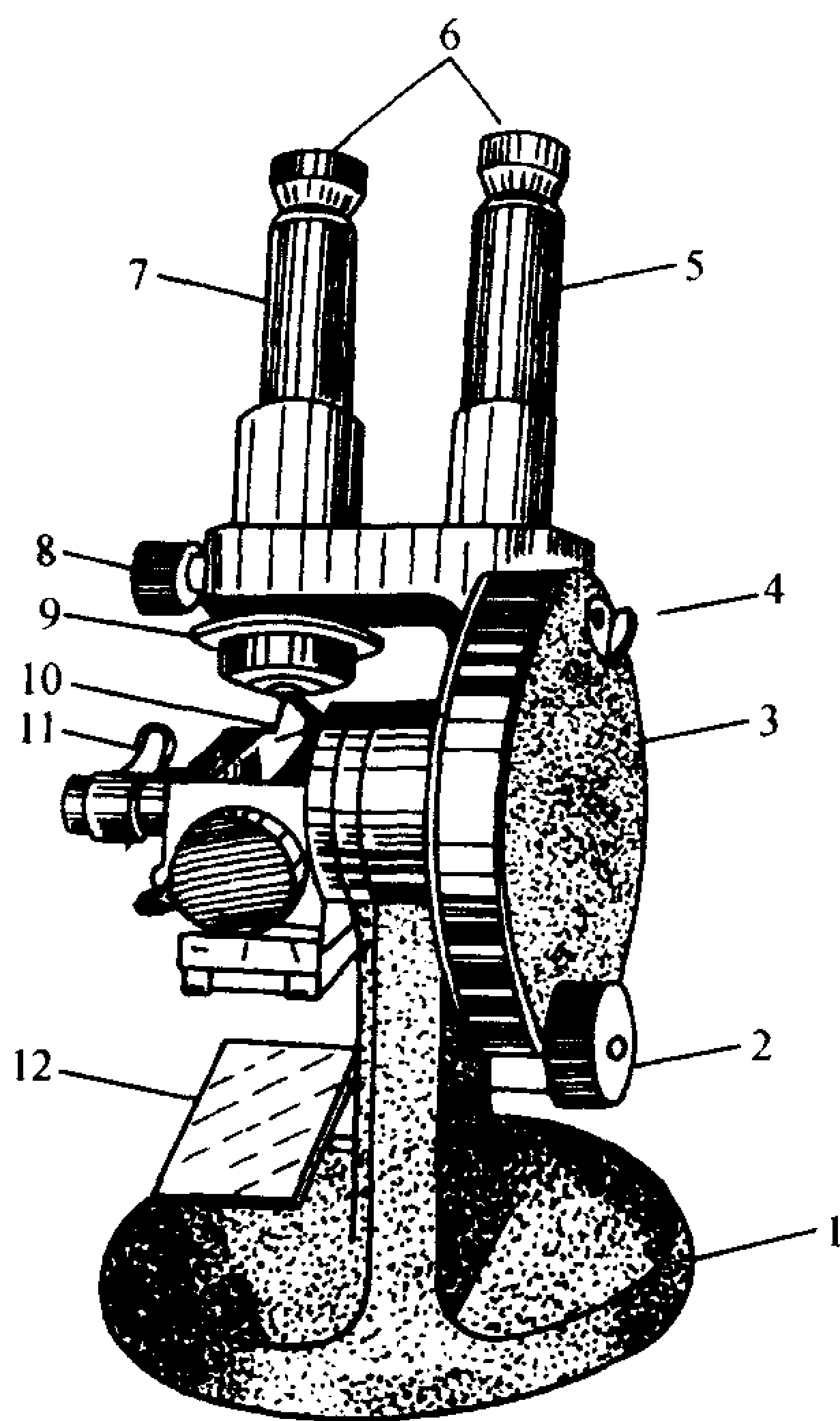


图 4－7

1. 底架；2. 棱镜转动手轮；3. 圆盘组(内有刻度板)；4. 小反光镜；5. 读数镜筒；6. 目镜；7. 望远镜筒；8. 阿米西棱镜手轮；9. 色散值刻度圈；10. 棱镜锁紧手柄；11. 棱镜组；12. 反光镜

镜组同时转动，可使明暗分界线位于视场中央，并与测量叉丝的交点对准．视场里的分度标尺上有两行刻度，一行可以直读折射率的数值，另一行刻有百分浓度，作为测定糖溶液浓度的专用标尺．

测量

一、液体折射率的测定

1．转动棱镜锁紧手柄(10)，打开棱镜，用脱脂棉沾一些无水酒精将棱镜面轻轻地擦干净．在照明棱镜的磨砂面上滴上一二滴待测液体，旋紧棱镜锁紧手柄，使液膜均匀，无气泡，并充满视场．

2．调节两反光镜(4)及(12)，使两镜筒视场明亮．

3．旋转手轮(2)使棱镜组(11)转动，这时在望远镜视场中可观察到明暗分界线上下移动，旋转阿米西棱镜手轮(8)，使视场中除黑白二色外无其它颜色．将分界线对准十字叉丝中心，于是读数镜视场右边所指示的刻度值，即为待测液体折射率 n 的数值．例如图 4－8 所示时，折射率为 $n=1.4383$．

4．依同样方法，重复步骤 1～3，测量另一种待测液体的折射率，并与方法一测得的结果进行比较，分析测量误差．

二、固体折射率的测定

自行设计实验步骤，测定玻璃样品的折射率．

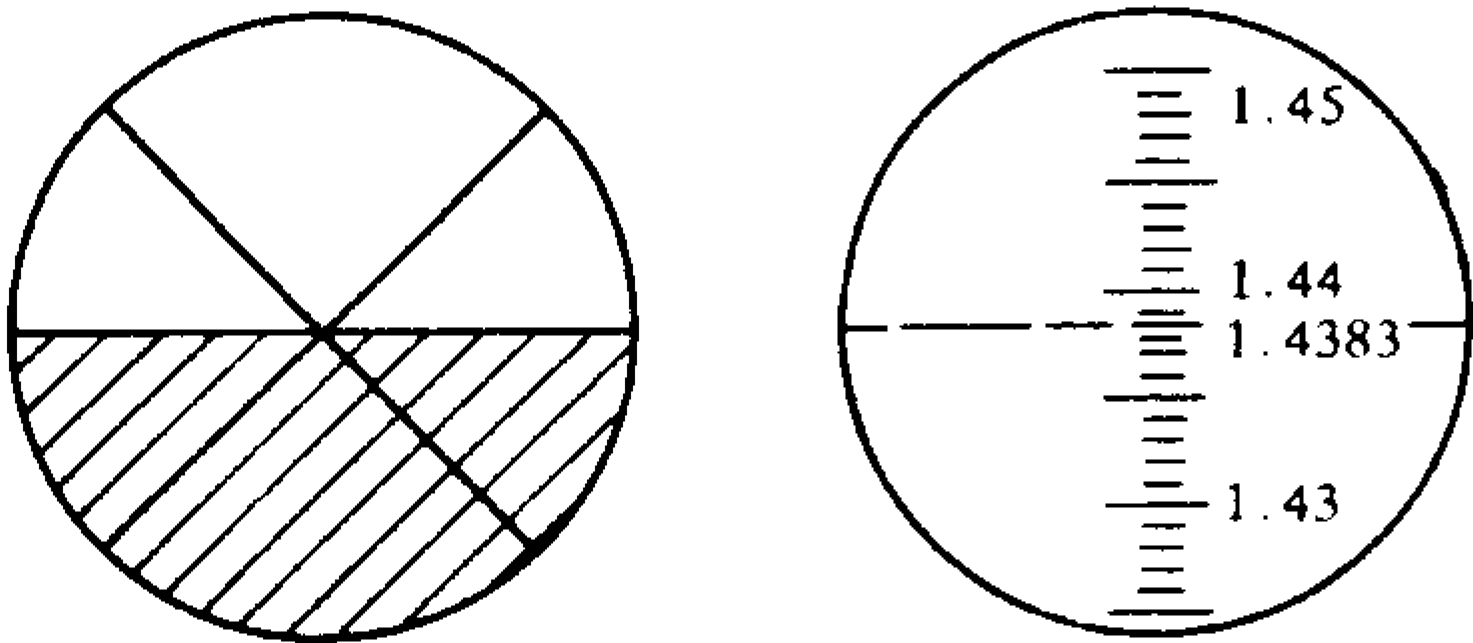


图 4－8

注意事项

1. 测量工作开始前,注意做好棱镜面的清洁工作,以免在工作面上残留其它物质而影响测量精度.

2. 必须对阿贝折射计进行读数校正. 通常,最简便的方法是用蒸馏水来校正,因蒸馏水在一定温度(20℃)和一定光源(钠光589.3 nm)照射下,它的折射率为已知值,$n_{水}=1.3330$. 为此,只要滴几滴蒸馏水到进光棱镜上,调节并读取其折射率数值,如不相符,可微动仪器上的校正螺旋,使之完全相同. 这样,折射计的读数就得到校正.

如使用仪器中的标准玻璃块($n_D=1.5172$)进行校正,则应根据测定固体折射率的方法,在标准玻璃块与折射棱镜之间滴入高折射率的接触液,按上述方法进行校正.

3. 任何物质的折射率都与测量时使用的光波波长和温度有关,本仪器在消除色散的情况下测得的折射率,其对应光波的波长$\lambda=589.3$ nm;如需要测量不同温度时的折射率,可将阿贝折射计与恒温、测温装置连用,待棱镜组和待测物质达到所需温度后,方能进行测量. 一般均在室温下进行.

复习思考题

1. 怎样应用掠入射法测定玻璃棱镜的折射率? 简要说明实验方法,并推导出折射率的计算公式.

2. 用阿贝折射计测量固体折射率时,为什么要滴入高折射率的接触液? 为什么它对测量结果没有影响? 试论证之.

实验五　望远镜和显微镜

目的

1. 熟悉显微镜和望远镜的构造及其放大原理；

2. 学会一种测定显微镜和望远镜放大率的方法；

3. 掌握显微镜的正确使用方法，并学会利用显微镜测量微小长度；

4. 理解光学仪器分辨本领的物理意义，并测定望远镜和显微镜的分辨本领.

原理

显微镜和望远镜都是用途极为广泛的助视光学仪器. 显微镜主要是用来帮助人眼观察近处的微小物体，而望远镜则主要是帮助人眼观察远处的目标. 它们的作用都在于增大被观察物体对人眼的张角，起着视角放大的作用.

显微镜和望远镜的视角放大率 M 定义为

$$M = \frac{\text{用仪器时虚像所张的视角 } \alpha_0}{\text{不用仪器时物体所张的视角 } \alpha_e} \tag{5-1}$$

显微镜和望远镜的光学系统十分相似，都是由物镜和目镜两部分组成. 以显微镜为例，其构造一般可认为是由两个会聚透镜共轴组成. 如图 5－1 所示，实物 PQ 经物镜 L_o 成倒立实像 $P'Q'$ 于目镜 L_e 的物方焦点 F_e 的内侧，再经目镜 L_e 成放大的虚像 $P''Q''$ 于人眼的明视距离处.

理论计算可得显微镜的放大率为

$$M = M_o \cdot M_e = -\frac{\Delta \cdot s_0}{f'_o \cdot f'_e} \tag{5-2}$$

式中 M_o 是物镜的放大率，M_e 是目镜的放大率，f'_o，f'_e 分别是物

镜和目镜的像方焦距，Δ 是显微镜的光学间隔（$=F'_oF_e$，现代显微镜均有定值，通常是 17 cm 或 19 cm），$s_0=-25$ cm，为正常人眼的明视距离. 由上式可知，显微镜的镜筒越长，物镜和目镜的焦距越短，放大率就越大. 一般 f'_o 取得很短（高倍的只有 1～2 mm），而 f'_e 在几个厘米左右. 在镜筒长度固定的情况下，如果物镜和目镜的焦距给定，则显微镜的放大率也就确定了. 通常物镜和目镜的放大率，是标在镜头上的.

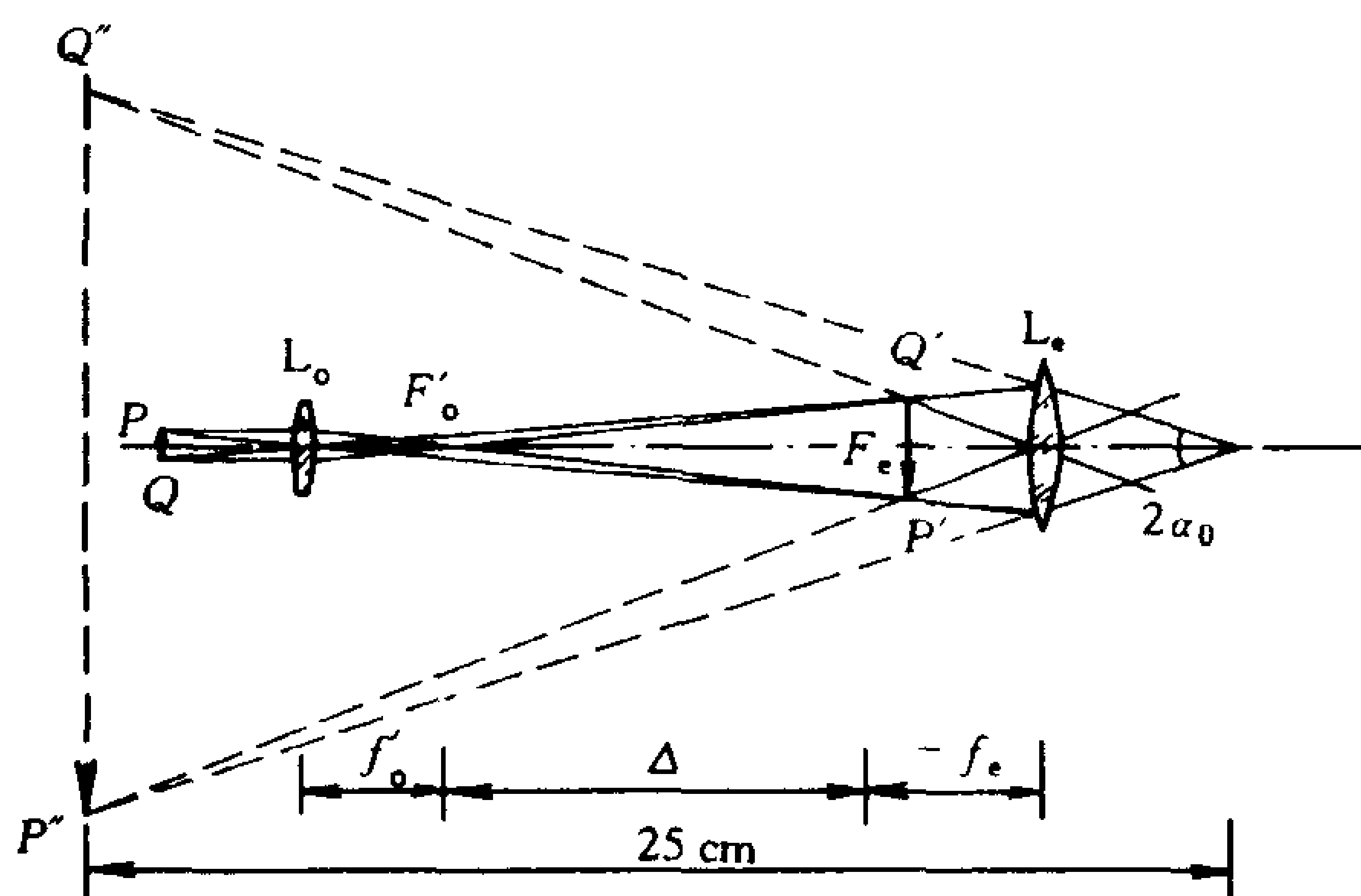


图 5－1

对于望远镜，两透镜的光学间隔近乎为零，即物镜的像方焦点与目镜的物方焦点近乎重合. 望远镜可分两类：若物镜和目镜的像方焦距均为正（即两个都是会聚透镜），则为开普勒望远镜；若物镜的像方焦距为正（会聚透镜），目镜的像方焦距为负（发散透镜），则为伽利略望远镜. 图 5－2 所示为开普勒望远镜的光路示意图. 远处物体 PQ 经物镜 L_o 后在物镜的像方焦点 F'_o 上成一倒立实像 $P'Q'$，像的大小决定于物镜焦距及物体与物镜间的距离. 像 $P'Q'$ 一般是缩小的，近乎位于目镜的物方焦面上，经目镜 L_e 放大后成虚像 $P''Q''$ 于观察者眼睛的明视距离与无穷远之间.

由理论计算可得望远镜（$\Delta=0$）的放大率为

$$M = -\frac{f'_o}{f'_e} \tag{5-3}$$

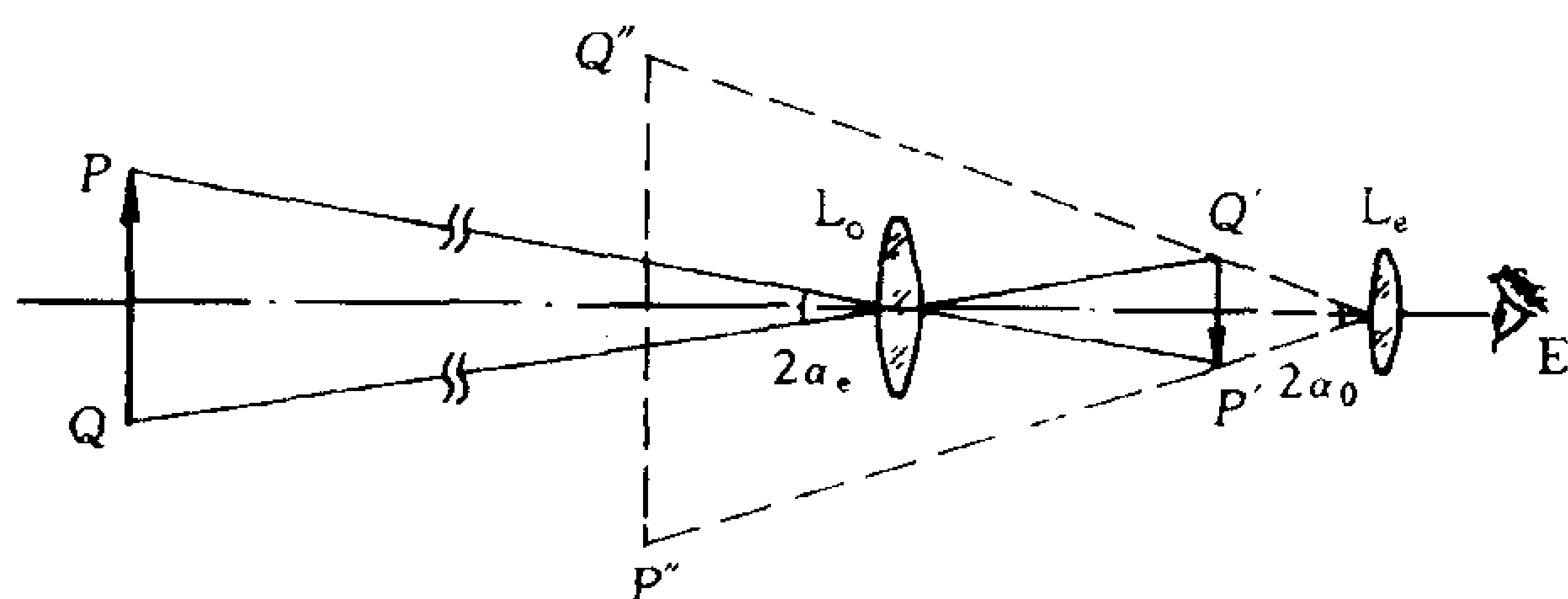


图 5-2

上式表明,物镜的焦距越长、目镜的焦距越短,望远镜的放大率则越大. 对开普勒望远镜($f'_o>0$,$f'_e>0$),放大率 M 为负值,系统成倒立的像;而对伽利略望远镜($f'_o>0$,$f'_e<0$),放大率 M 为正值,系统成正立的像. 因实际观察时,物体并不真正位于无穷远,像亦不成在无穷远,但式(5-3)仍近似适用.

用显微镜或望远镜观察物体时,一般视角均甚小,因此视角之比可用其正切之比代替,于是光学仪器的放大率 M 可近似地写成

$$M = \frac{\text{tg}\,\alpha_0}{\text{tg}\,\alpha_e} \tag{5-4}$$

测定显微镜和望远镜放大率最简便的方法如图 5-3 所示.

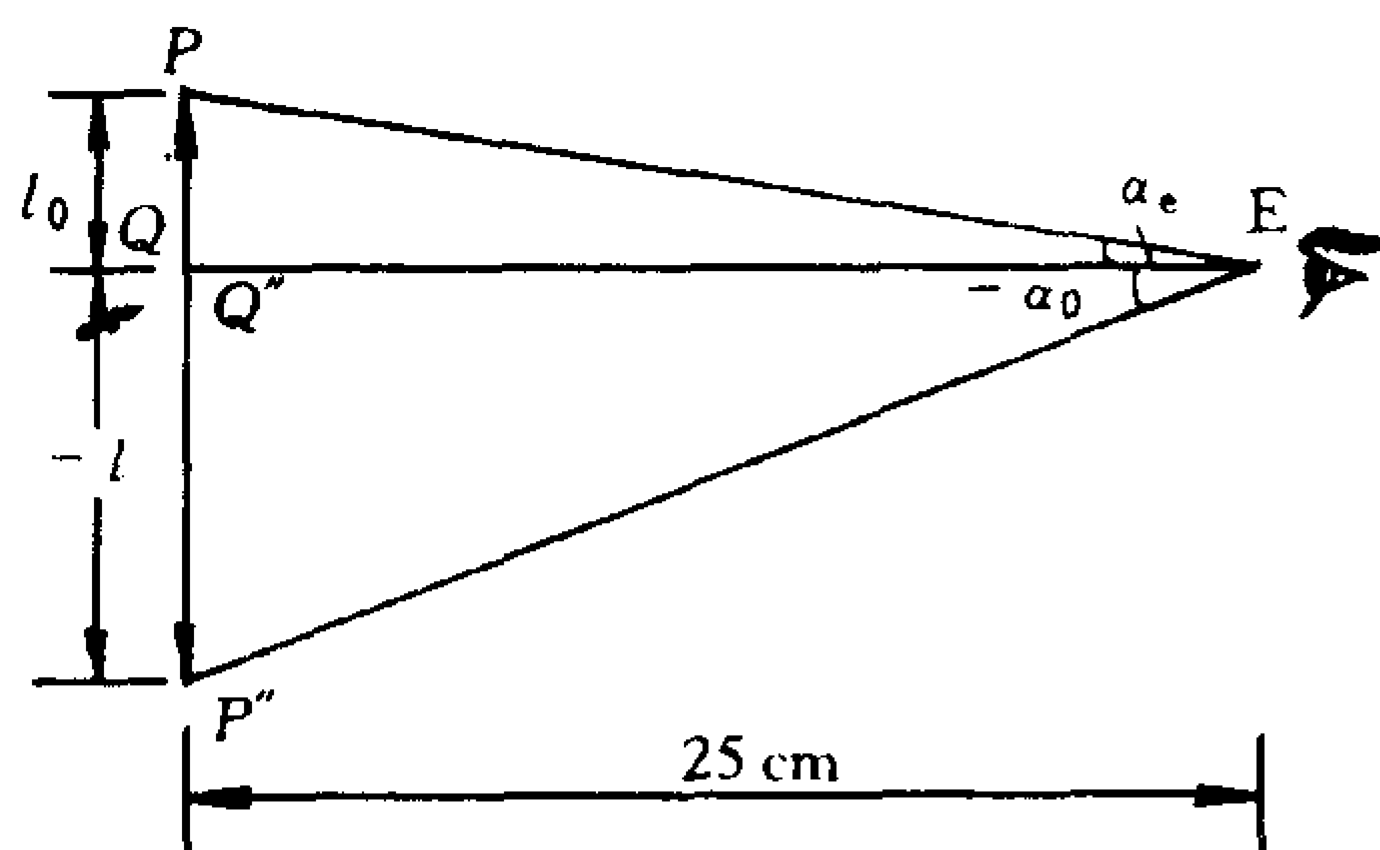


图 5-3

仍以显微镜为例,设长为 l_0的目的物 PQ 直接置于观察者的明视

距离处，其视角为 α_e，从显微镜中最后看到的虚像 $P''Q''$ 亦在明视距离处，其长度为 $-l$，视角为 $-\alpha_0$. 于是

$$M=\frac{\operatorname{tg}\alpha_0}{\operatorname{tg}\alpha_e}=\frac{l}{l_0} \tag{5-5}$$

因此，如用一刻度尺作目的物，取其一段分度长为 l_0，把观察到的尺的像投影到尺面上，设被投影后像在刻度尺上的长度是 l，则由式(5-5)就可求得显微镜的放大率.

当望远镜对无穷远调焦时，望远镜筒的长度(即物镜与目镜之间的距离)就可认为是 $f'_o+f'_e$. 这时如将望远镜的物镜卸下，在它的原来位置放一长度为 l_1 的目的物(十字叉丝光阑)；于是，在离目镜 d 处，得到该物经目镜所成的实像. 设其像长为 $-l_2$，则根据透镜成像公式得

$$l_1/(-l_2)=(f'_o+f'_e)/d \tag{5-6}$$

及

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f'_o+f'_e}=\frac{1}{f'_e} \tag{5-7}$$

从(5-6)、(5-7)两式中消去 d，得

$$M=-\frac{f'_o}{f'_e}=\frac{l_1}{l_2} \tag{5-8}$$

因此只要测出光阑的长度 l_1 及其像长 l_2，即可算出望远镜的放大率.

实验内容

练习一　测定显微镜和望远镜的放大率

仪器和用具

显微镜，望远镜，米尺及标尺，十字叉丝光阑.

测量

一、测定移测显微镜的放大率

1. 如图 5－4 所示将显微镜夹持好，在垂直于显微镜光轴方向距离目镜 25 cm 处放置一毫米分度的米尺(B)，在物镜前放置另一毫米分度的短尺(A). 调节显微镜，使从显微镜中能看到短尺 A 的像. 用一只眼睛通过显微镜观察短尺 A 的像，另一只眼睛直接看米尺 B. 经过多次观察，调节眼睛使得显微镜中看到的 A 尺的像被投影到靠近米尺 B 时[如图 5－4(b)]，选定 A 尺的像上某一分度 l_0，记录其相当于 B 尺上的分度 l，即得放大率 $M=\frac{l}{l_0}$[图 5－4(b)所示，$M=20$]. 重复几次，取其平均值.

2. 显微镜镜筒改变以后，光学间隔随之改变，因而放大率亦随之变化. 将显微镜镜筒稍作改变，再测一次放大率. 重复几次，取其平均值.

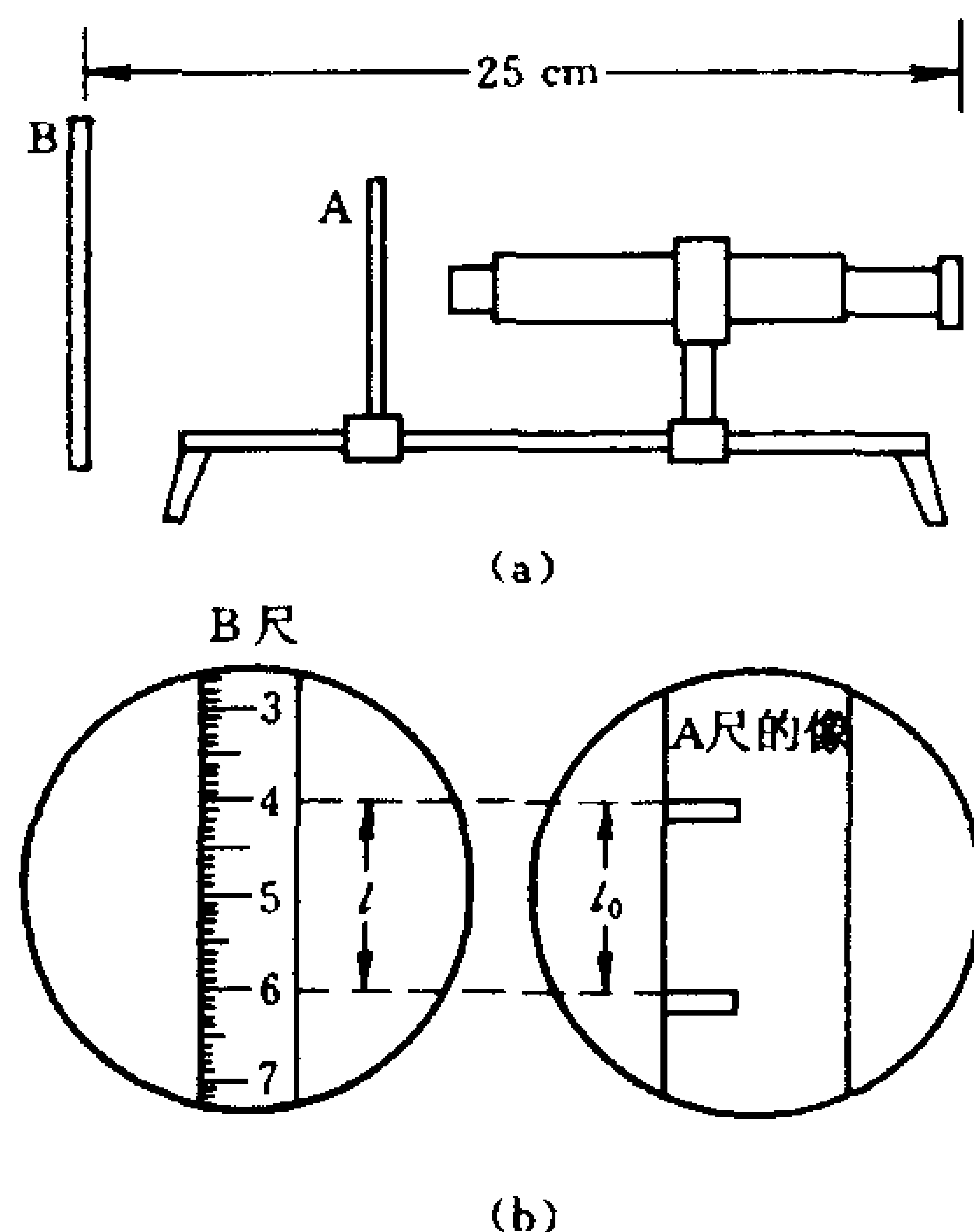


图 5－4

二、望远镜放大率的测定

1. 把望远镜调焦到无穷远，也就是使望远镜能清楚地看到远处的物体.

2. 卸下望远镜物镜，并在原物镜位置装一十字叉丝光阑.

3. 利用移测显微镜测出由望远镜目镜所成十字叉丝像的长度，并用移测显微镜直接测出光阑上十字叉丝的长度.

设十字叉丝的长度分别为 l_1 与 l'_1，它们经望远镜目镜所成像的长度分别是 l_2 与 l'_2，于是由式(5－8)可得望远镜的放大率

$$M = \frac{1}{2}\left(\frac{l_1}{l_2} + \frac{l'_1}{l'_2}\right)$$

将所得结果与其标称值进行比较.

练习二　用显微镜测量微小长度

仪器和用具

生物显微镜，目镜测微尺，标准石英尺，测微目镜，待测样品(如光刻板、光栅、标本玻片等).

常用的生物显微镜的构造和外形如图 5－5 所示，由光学和机械两大部分组成.

1. 光学部分的成像系统由目镜(1)和物镜(7)组成. 目镜由两块透镜装置在目镜镜筒中构成，筒上标有放大率，常用的有5×、10×、15×、(或 12.5×). 物镜由多块透镜复合构成，装置在物镜转换器(6)上，转动转换器可调换使用. 通常配有物镜三个，放大率分别为 10×、40×、100×(或 8×、45×、100×). 由物镜和目镜的相互组合，可得九种不同的放大率.

光学部分的照明系统由聚光镜(10)，可变光阑(11)和反射镜(12)组成. 反射镜将外来光线导入聚光镜，并由聚光镜聚焦，以照

亮被观察物. 可变光阑可改变孔径调节照明亮度,以便使用不同数值孔径的物镜观察时获得清晰的像.

2. 机械部分由镜筒(2)、镜架(3)、镜座(13)等组成. 物镜转换器(6)装有三个物镜,可借助转动而调换. 调节器分粗调手轮(4)和微调手轮(5)两种. 转动粗调手轮可使镜筒明显升降,为粗调对光之用;转动微调手轮镜筒则升降甚微,用以精确地对物调焦. 载物台(8)在物镜下方,为搁置载物玻片和标本之用. 载物台移动手轮(9)装在载物台上,用以前后左右移动载物玻片和标本. 移动距离可由游标尺(14)读出.

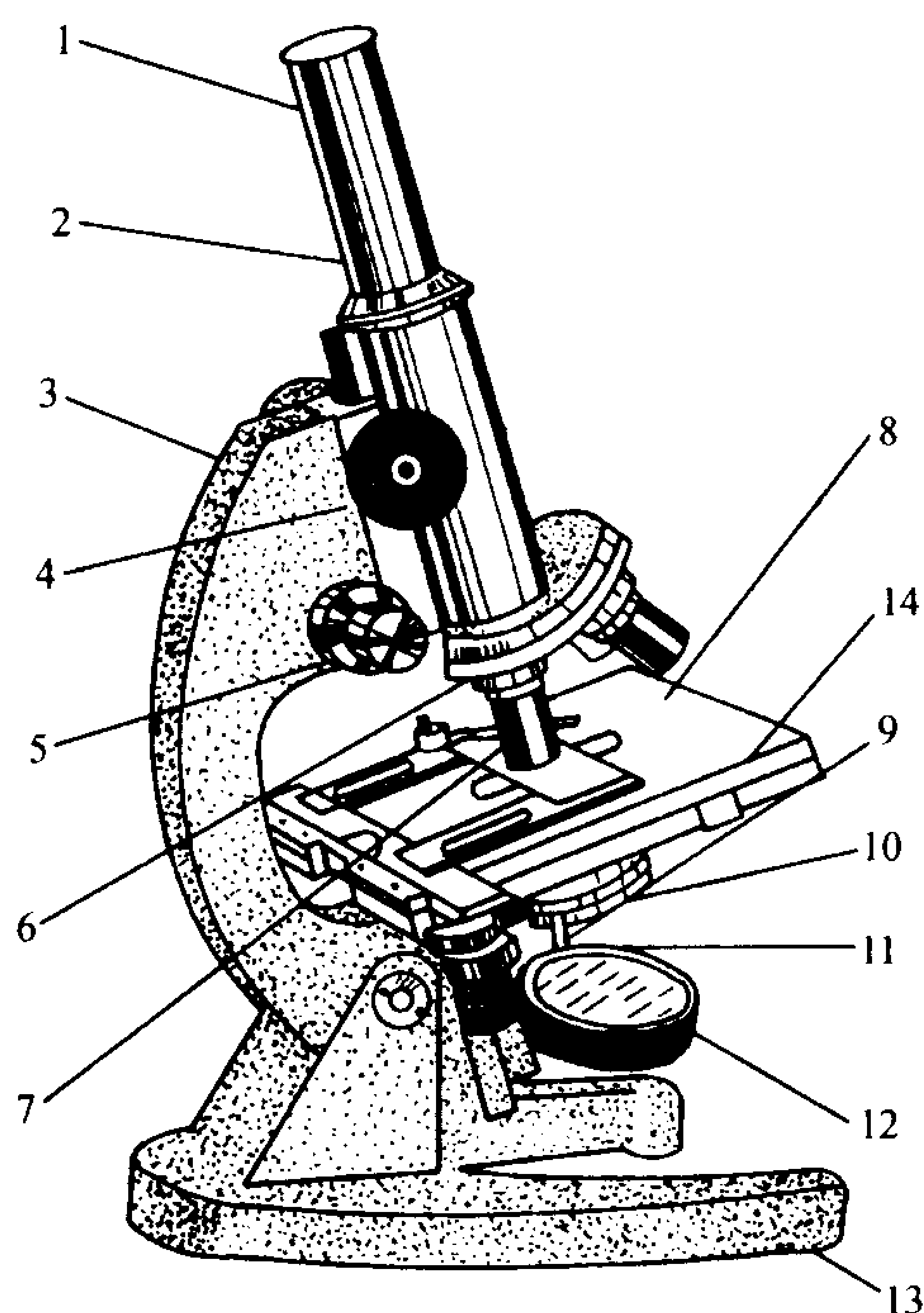


图 5-5

1. 目镜;2. 镜筒;3. 镜架;4. 粗调手轮;5. 微调手轮;6. 物镜转换器;
7. 物镜;8. 载物台;9. 载物台移动手轮; 10. 聚光器;11. 可变光阑旋柄;
12. 反光镜;13. 镜座;14. 游标尺

显微镜系精密光学仪器，要注意保养维护，使用时应严格遵守操作规程和使用方法（参阅仪器使用说明书）．特别是使用高倍物镜时，由于物镜视场小而暗，工作距离短，调节较为困难，必须细心操作．例如100×物镜，工作距离只有0.2 mm左右，调焦稍不小心，物镜就可能与被观察物接触而受到挤压，造成损坏．为此，规定调焦的操作规程如下：(1)需要使用高倍物镜时，先用低倍物镜进行观察调节；(2)先用粗调手轮把镜筒往下调，并从旁边严密监视，使物镜镜头慢慢靠近被观察物而又不接触；(3)然后，从目镜中观察，并慢慢转动粗调手轮使镜筒上升（不许下降！），使镜头与物间距离逐渐增大，直至观察到物的像；(4)这时转动转换器，换用高倍物镜观察（转换时物镜不会碰到被观察物），稍加调节微调手轮，即可获得最清晰的像，至此调焦完毕．

方法一：利用显微镜、目镜测微尺及石英尺测量微小长度

测量

1．将所需测量的样品或标本放在载物台上夹住．

2．将各倍率的物镜顺序装于物镜转换器上；选择适当倍率的目镜，并把目镜测微尺放入目镜镜筒，然后插入显微镜镜筒中．

3．根据需要调节聚光镜、反光镜及光阑，使目镜中观察到强弱适当而均匀的视场．

4．熟悉显微镜的机械结构，学会调节使用，特别要熟悉粗调手轮和微调手轮的使用方法，弄清镜筒的升降（顺时针转动手轮是下降，逆时针转动是上升），做到熟练掌握，调节自如．

5．先用低倍物镜对物进行调焦，遵照操作规程先粗调、后微调，直至目镜视场中观察到最清晰的像．如果被观察物的像不在视场中心，则可调节载物台移动手轮，将其移至视场中心进行观察．

6．转动转换器，换用高倍物镜观察，略微调节微调手轮，直至所观察的像最为清晰．

7．将观察的样品或标本取下，换上标准石英尺（常用的石英

尺刻度部分全长 1 mm,共分为 100 小格,每格宽为 0.01 mm). 转动目镜镜筒,使目镜测微尺的刻度与视场中标准石英尺的刻度相平行,并移动载物台,使之重合,读取目镜测微尺上的几个分格在标准石英尺上的分格数,以定标目镜测微尺的分格值. 记下所用物镜的放大率,比较实验结果.

8. 取下标准石英尺,换上观察样品标本,测量其长度. 在不同部位或不同方位下测量几次,取其平均值.

方法二:利用显微镜配备的测微目镜测量微小长度:

本方法实际上和方法一基本相同,所不同的是将显微镜上的目镜取下,换上测微目镜,把它插入显微镜镜筒中,同样用比较法测量微小长度.

测量

1. 将标准石英尺放在显微镜载物台上夹住;

2. 将显微镜上目镜卸下,换上测微目镜,调焦至物的像最为清晰.

3. 转动测微目镜鼓轮(或转动载物台移动手轮),使分划板上叉丝的取向与标准石英尺平行. 然后将叉丝移至和显微镜视场中标准石英尺某一刻度重合,记下测微目镜的读数(包括测微尺刻度和鼓轮刻度读数)m,如图 5-6 所示.

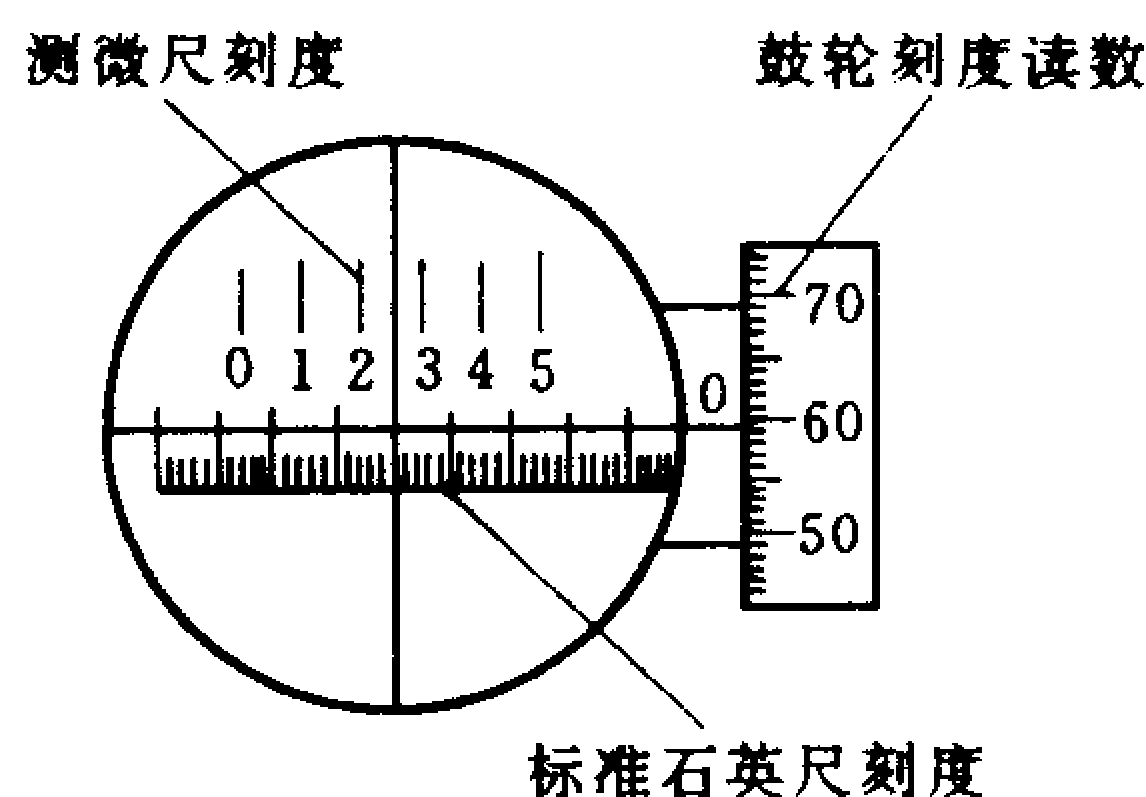


图 5-6

4. 转动测微目镜鼓轮,使叉丝在标准石英尺上移动 N 格,这时叉丝与标准石英尺上另一刻度线重合,记下测微目镜的读数 n.

5. 重复测量几次，求出$|m-n|$的平均值，计算出测微目镜鼓轮每1小格所对应的叉丝实际移动的长度. 这样，测微目镜刻度便得到定标.

6. 取下标准石英尺，换上所需测量的标本玻片（图样、刻度等），对每一长度重复测量几次，取其平均值.

练习三　显微镜和望远镜的分辨本领

原理

根据光的衍射理论，任何助视光学仪器对任一物点成像时，因孔径光阑的夫琅禾费衍射作用，其像均非一点，而为一光斑(艾里斑). 因此，当两个物点靠得很近时，相应的艾里斑可能重叠过多，人们将无法分辨它们是由两个物点产生的像，而以为只是一个物点产生的. 因此，常用分辨本领以表示光学仪器分辨邻近物体或细节的能力，它是光学仪器性能的重要指标之一，但各种光学仪器因构造和用途不一样，同样根据瑞利判据，衡量各自分辨本领的方式也不一样.

望远镜的分辨本领用最小分辨角$\delta\theta$表示. 其理论值可由下式计算：

$$\delta\theta = 1.22\frac{\lambda}{D} \tag{5-9}$$

式中λ是光波波长，D为望远镜物镜的孔径，计算的角度单位是弧度. 因此，当两个物体P_1、P_2对望远镜物镜的张角小于$\delta\theta$值时，望远镜将无法分辨它们. 显然，物镜孔径D值越大，$\delta\theta$就越小，即分辨本领越高.

显微镜的分辨本领是用最小分辨距离δy表示，其理论值(不计像差)为

$$\delta y = \frac{0.61\lambda}{n\sin(\theta/2)} = \frac{0.61\lambda}{N_A} \tag{5-10}$$

式中，λ为光波波长，n为显微镜物方空间的折射率，θ为物镜对

轴上物点的张角．通常将 $n\sin\frac{\theta}{2}$ 称为物镜的数值孔径，用 N_A 表示①，并将其数值标记在物镜镜筒上．式(5－10)表明，物镜的数值孔径越大，最小分辨距离就越小，因而物镜的分辨本领就越高．一般情况下，物镜的分辨本领就是整个显微镜的分辨本领．

仪器和用具

准直管，分辨率板，望远镜，圆孔光阑，移测显微镜，辅助显微镜，米尺（附小灯）．

测量

一、望远镜最小分辨角的测定

1．将分辨率板放置在物镜的焦面上，用目镜小灯照亮，使平行光管产生平行光，如图 5－7 所示．

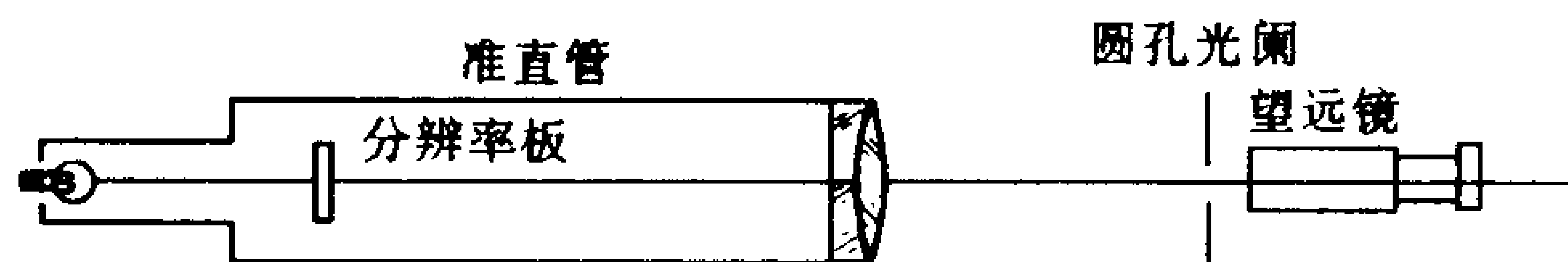


图 5－7

2．分辨率板上共有 25 组条纹，每组条纹有四个不同取向，如图 5－8 所示．每组条纹的宽度和角距均相同，各组条纹的具体数值见表 5－1．

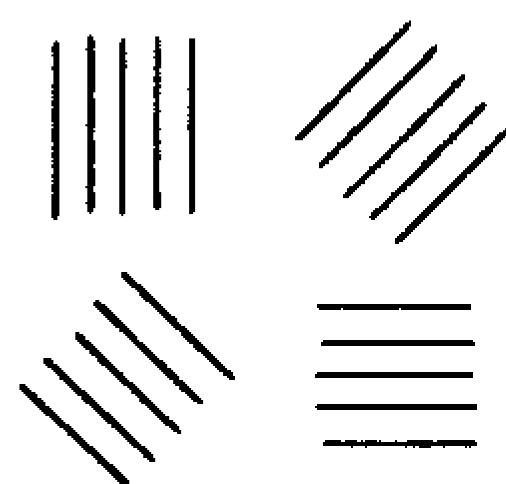


图 5－8

用待测望远镜直接观察分辨率板的像，找出分辨率板上刚刚能看出有条纹分布的组号（只要能看见任一取向的条纹，就算该组号的条纹能被分辨），从表

① 过去习惯上用 N. A. 表示数值孔径，现因国标要求量的符号要用单个的斜体字母表示，故改用 N_A 表示数值孔径．

5－1中查出相应组号条纹的角距，即为该望远镜最小分辨角的实验值.

表 5－1　分辨率板条纹宽度及最小分辨角①

分辨率板号		2 号		3 号	
单元号码	每组刻纹数	$b/\mu m$	$\beta/('')$	$b/\mu m$	$\beta/('')$
1	4	20.0	15.00	40.0	30.00
2	4	18.9	14.18	37.8	28.35
3	4	17.8	13.35	35.6	26.70
4	5	16.8	12.60	33.6	25.20
5	5	15.9	11.93	31.7	23.78
6	5	15.0	11.25	30.0	22.50
7	6	14.1	10.58	28.3	21.23
8	6	13.3	9.98	26.7	20.03
9	6	12.6	9.45	25.2	18.90
10	7	11.9	8.93	23.8	17.85
11	7	11.2	8.40	22.5	16.88
12	8	10.6	7.95	21.2	15.90
13	8	10.0	7.50	20.0	15.00
14	9	9.4	7.05	18.9	14.18
15	9	8.9	6.68	17.8	13.35
16	10	8.4	6.30	16.8	12.60
17	11	7.9	5.93	15.9	11.93
18	11	7.5	5.63	15.0	11.25
19	12	7.1	5.33	14.1	10.58
20	13	6.7	5.03	13.3	9.98
21	14	6.3	4.73	12.6	9.45
22	14	5.9	4.43	11.9	8.93
23	15	5.6	4.20	11.2	8.40
24	16	5.3	3.98	10.6	7.95
25	17	5.0	3.75	10.0	7.50

①表中的 b 表示刻纹宽度，β 表示当 f' 为标称值时的最小分辨角.

3．用游标尺测量物镜的孔径 D，测量几次，将平均值代入式

(5 - 9)计算 $\delta\theta$ 的理论值，并与实验值比较，因采用白光照明，计算时取 $\lambda = 550$ nm.

4. 为观察孔径 D 对分辨本领的影响，在望远镜物镜前另加一圆孔光阑，其直径应比物镜孔径小. 同步骤 2、3，重复测量与计算并和不用光阑时的结果比较.

二、移测显微镜分辨本领的测定

显微镜的分辨本领主要决定于物镜，实验时，因 $n = 1$，故 $N_A = \sin\frac{\theta}{2}$.

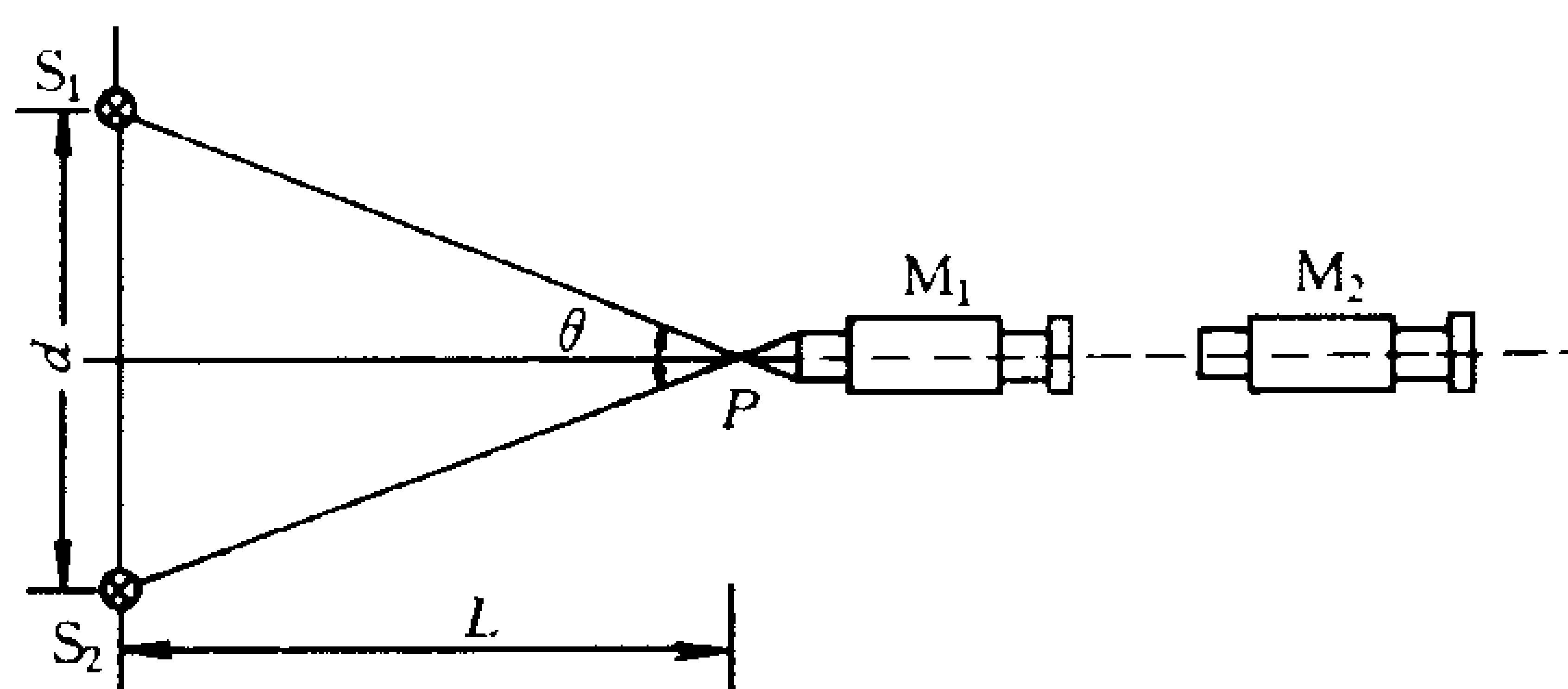


图 5 - 9

1. 将待测显微镜 M_1 与辅助显微镜 M_2 按图 5 - 9 所示，共轴调节好.

2. 在待测显微镜 M_1 前方 L 远处垂直于光轴放置米尺. 点亮米尺杆上的小灯 S_1 和 S_2，调节辅助显微镜并从中观察到米尺上小灯的清晰像.

3. 移动米尺上小灯的位置，使小灯 S_1 和 S_2 的像分别位于显微镜 M_2 视场的边缘，记下小灯 S_1、S_2 间的距离 d.

4. 移开辅助显微镜 M_2，将米尺移近待测显微镜(保持待测显微镜不动)到直接观察米尺清晰像的位置 P，米尺移动的距离即为 L，则近似有 $\sin\frac{\theta}{2} = \frac{d}{2L}$.

5. 将 $\sin\frac{\theta}{2}$ 值代入式(5－10),计算显微镜的最小分辨距离(取 $\lambda = 550$ nm).

复习思考题

1. 显微镜与望远镜有哪些相同之处与不同之处?

2. 显微镜测量微小长度时,用测微目镜测定石英标准尺 m 个分格的数值为 Δx,为什么它和石英标准尺相应分格的实际值 Δx_0 之比不等于物镜的放大率?

3. 评价天文望远镜时,一般不讲它是多少倍的,而是说物镜口径多大,你能说明为什么吗?

实验六　用小型棱镜摄谱仪测定光波波长

目的

1. 了解棱镜摄谱仪的构造原理；
2. 初步掌握棱镜摄谱仪的调节方法和摄谱技术；
3. 学会用照相法测定某一光谱线的波长.

仪器和用具

玻璃棱镜摄谱仪，汞灯，待测波长的光源(如氦－氖激光器、氢灯、钠灯)，移测显微镜.

原理

我们知道，物质的原子和分子都辐射和吸收自己的特征光谱.分析物质的辐射或吸收光谱，就可以了解物质的组成和各成分的含量. 由于光谱分析具有较高的灵敏度，特别是对低含量元素的分析准确度较高，分析速度快，因此，在科学实验和研究中有着重要应用.

一、棱镜摄谱仪的构成(图 6－1)

1. 准直管

准直管由狭缝 S_1 和透镜 L_1 组成. S_1 位于 L_1 的物方焦面上. 被分析物质发出的光射入狭缝，经透镜 L_1 后就成为平行光. 实际使用中，为了使光源 S 射出的光在 S_1 上具有较大的照度，在光源与狭缝之间放置会聚透镜 L，使光束会聚在狭缝上.

2. 棱镜部分

主要是一个(或几个)棱镜 P. 由于棱镜的色散作用，不同波长的平行光被分解成不同方向的平行光.

3. 光谱接收部分

摄谱仪的光谱接收部分是一个照相装置，它包括透镜 L_2 和放置在 L_2 像方焦面上的照相底板 F. 透镜 L_2 可使被棱镜分解开的各种不同波长的单色平行光聚焦在 F 的不同位置上[例如图 6-1 中 $F_1(\lambda_1)$和 $F_2(\lambda_2)$各点]；又因透镜对不同波长的光的焦距不同，因此不同波长的光经 L_2 聚焦后并不分布在与光轴垂直的同一平面上. 适当调整照相底板 F 的位置（有一定倾角），可以清晰地记录各种波长的谱线.

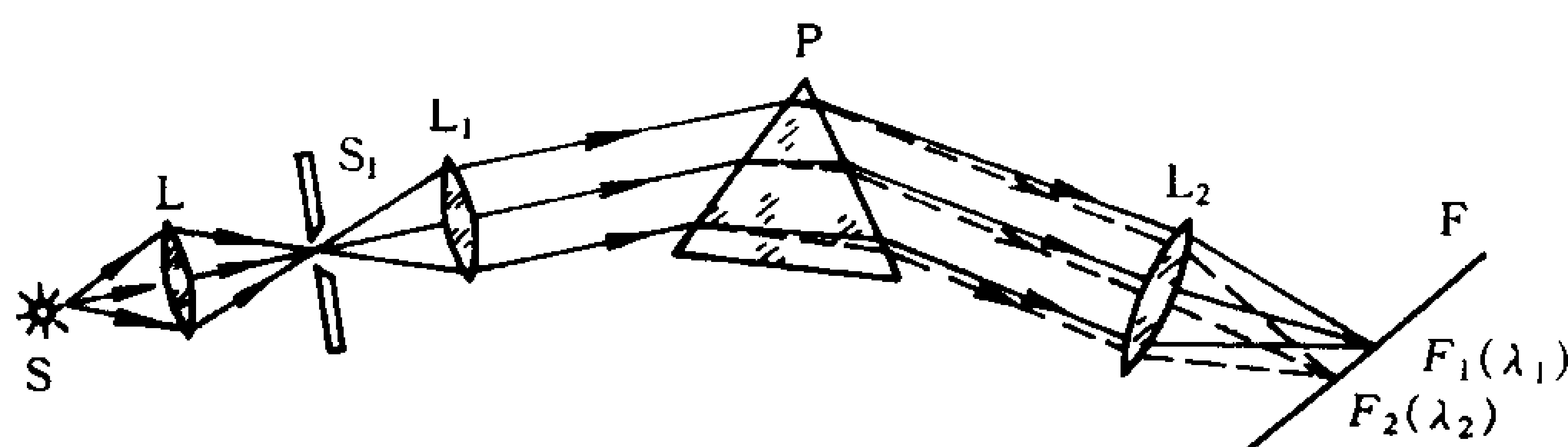


图 6-1

$F_1(\lambda_1)$、$F_2(\lambda_2)$…分别是波长为 λ_1 和 λ_2…的光所形成的狭缝的像，叫做光谱线，各条光谱线在底板上按波长依次排列，就形成被摄光源的光谱图.

若光源辐射的波长 λ_1、λ_2…等为分立值，则摄得的光谱线也是分立的，叫做线光谱；若光源辐射的波长为连续值，则摄得的是连续光谱.

本实验用的小型玻璃棱镜摄谱仪，可用来拍摄可见光区域的光谱. 其结构与图 6-1 所示的基本相同，但由于采用恒偏棱镜代替图 6-1 中的三棱镜，因此它的照相装置中光学系统的光轴与准直管的光轴垂直（图 6-2）.

二、摄谱仪的性能

1. 色散

它表征仪器分光的能力，即衡量复色光经仪器色散后，各单色

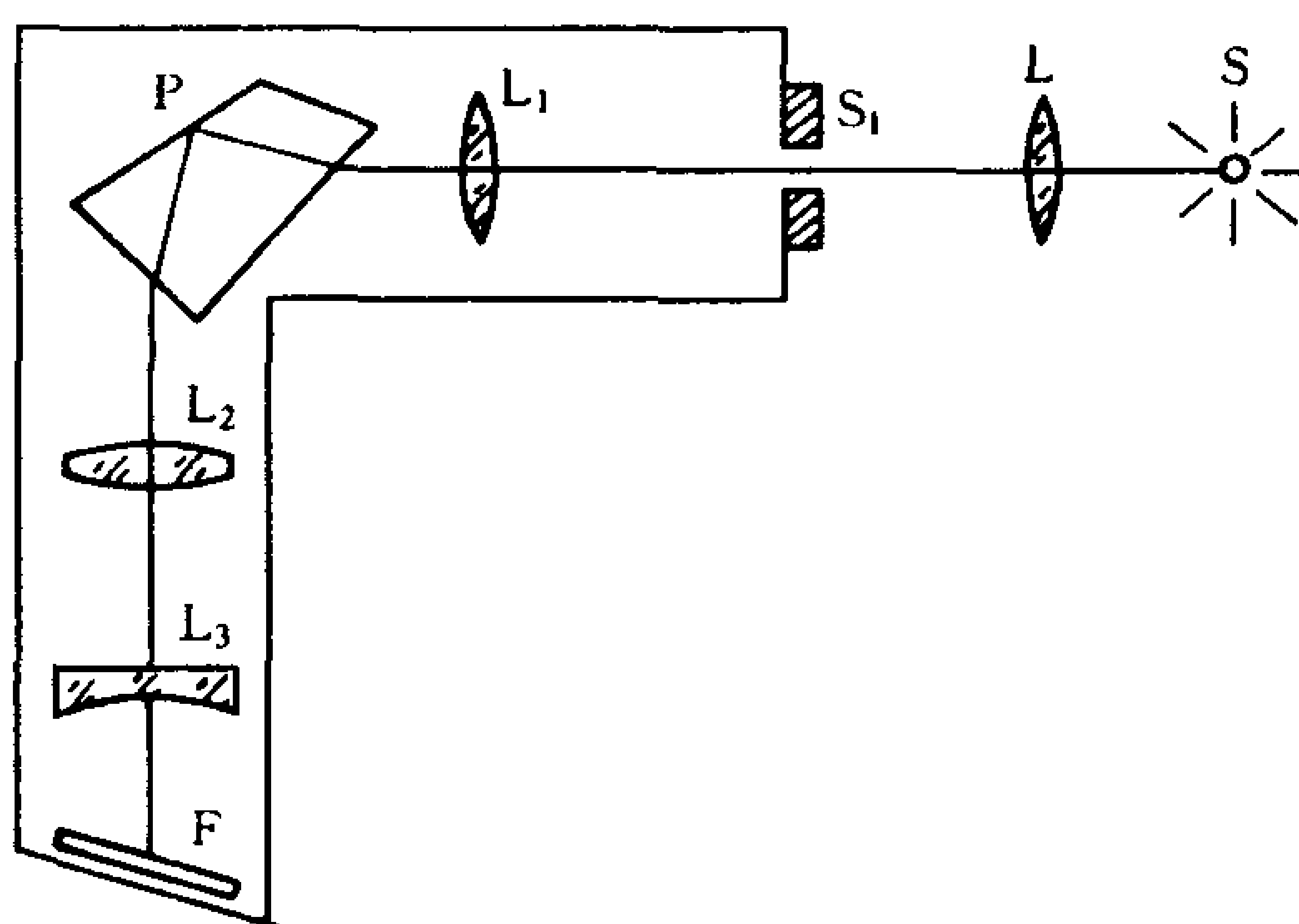


图 6-2

S 光源； L 会聚透镜； S_1 狭缝； L_1 准直管物镜；
P 恒偏向棱镜； L_2、L_3 照相物镜(组合)； F 照相底板

光分散的程度. 为了得到质量较好的光谱，某一波长的谱线总是以最小偏向角的状态通过棱镜，即不同波长的谱线有不同的最小偏向角，因此可用角色散表示棱镜色散的特征. 棱镜的角色散 D 为

$$D = \frac{\mathrm{d}\delta_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}\lambda} = \frac{2\sin\dfrac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2\sin^2\dfrac{A}{2}}} \cdot \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda} \qquad (6-1)$$

它表示相差单位波长的两谱线分开的角距离.

实际应用时，常使用线色散 $D_1 = \mathrm{d}l/\mathrm{d}\lambda$，以表示相差单位波长的两谱线在光谱面上分开的距离. 由图(6-3)可以看出

$$D_1 = D\frac{f'_2}{\cos\varepsilon} \qquad (6-2)$$

式中 f'_2 是聚光透镜 L_2 的焦距，ε 是底片与垂直光轴平面的夹角. 显然，仪器的线色散数值越大，不同波长两谱线中心分开的距离也越远.

2. 分辨本领

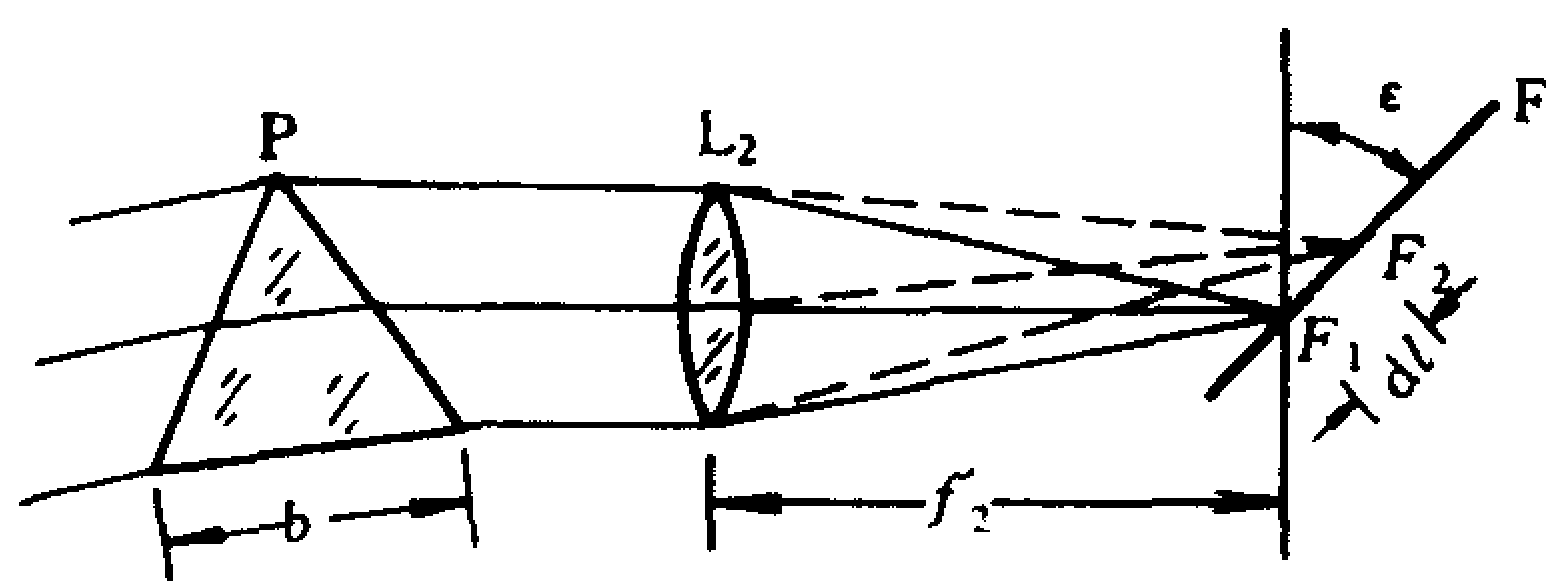


图 6－3

仪器分辨本领 R 的定义为

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} \tag{6-3}$$

其物理含义是摄谱仪摄取波长为 λ 附近的光谱时，刚刚能分辨两谱线的波长差为 $d\lambda$. $d\lambda$ 值越小，摄谱仪分辨光谱细节的能力就越高.

根据瑞利判据，色散棱镜的理论分辨本领为

$$R = b\frac{dn}{d\lambda} \tag{6-4}$$

式中 b 为棱镜底边的有效宽度. 可见，要提高棱镜摄谱仪的光谱分辨本领，必须选用高色散率的材料制作色散棱镜，且使底边较宽(b 大).

3. 相对孔径

为使照相底板上谱线能有较大的照度，以缩短摄谱时间，在不计光通过摄谱仪系统的光能损失(反射、吸收和散射)时，谱线的照度 E 主要决定于进光狭缝的亮度 B 和照相物镜 L_2(透光孔径为 D，焦距为 f'_2)的相对孔径 D/f'_2 即

$$E \propto B\left(\frac{D}{f'_2}\right)^2 \tag{6-5}$$

由式(6－5)可知，要增加谱线的照度，可应用聚光照明系统，提高狭缝的亮度；并选用相对孔径大的照相物镜.

本实验将使用小型棱镜摄谱仪，通过拍摄氦氖辉光和氦氖激光的比较光谱，测定氦氖激光的波长. 比较光谱就是将已知波长

的谱线组和待测波长的谱线组并列记录在同一底片上，只要记录时，保持各谱线组不发生横向移动，即可由辉光放电谱线的已知波长，利用线性内插法，测知激光谱线的波长.

实验内容

一、摄谱仪的调节

1. 调节共轴，将光源S置于准直物镜L_1的光轴上.

调节时，先将汞灯点亮，竖直放置和入射缝等高，沿摄谱仪的底座导轨将汞灯移近，观察者从暗盒中央向仪器内观察，调整光源的位置，使蓝色(435.8 nm)的光源像位于照相物镜L_2的中央. 此时，汞灯已位于L_1的光轴上.

2. 在光源与狭缝S_1之间加入聚光照明透镜L，调节透镜L的位置，使光源成像在入射缝上. 在更换光源时，只能调整光源的位置，而透镜L的位置则不应变动，以保证光源始终处在准直物镜L_1的光轴上.

3. 取去狭缝罩盖，在放置照相底板的位置上放一块毛玻璃，这时可看到汞灯的线光谱. 调节照相物镜位置和缝宽(刻度鼓轮上的分度值为0.005 mm，与刻度鼓轮配合的圆柱上的刻度一格为0.25 mm)，注意观察毛玻璃上是否所有谱线都清晰，如不清晰需调节暗匣相对于系统轴线的倾角.

(注意：在一般情况下应尽量避免将缝宽调到零，以免损坏刀口！)

4. 换用氦－氖激光器作光源，将氦－氖激光管竖直放置，调节其位置，观察氦－氖激光管侧面发出的辉光放电光谱(亦可选用氖放电管，用感应圈激发的辉光光谱作已知波长的谱线组).

5. 观察氦－氖激光的光谱线. 因激光束细窄而明亮，需使用短焦距的扩束透镜L′增大激光束的发散性，如图6－4所示，使激光束经平面镜M反射后沿L_1的光轴射入狭缝.

二、拍摄光谱

拍摄比较光谱时，常用如图 6－5 所示的哈脱曼光阑遮光．它

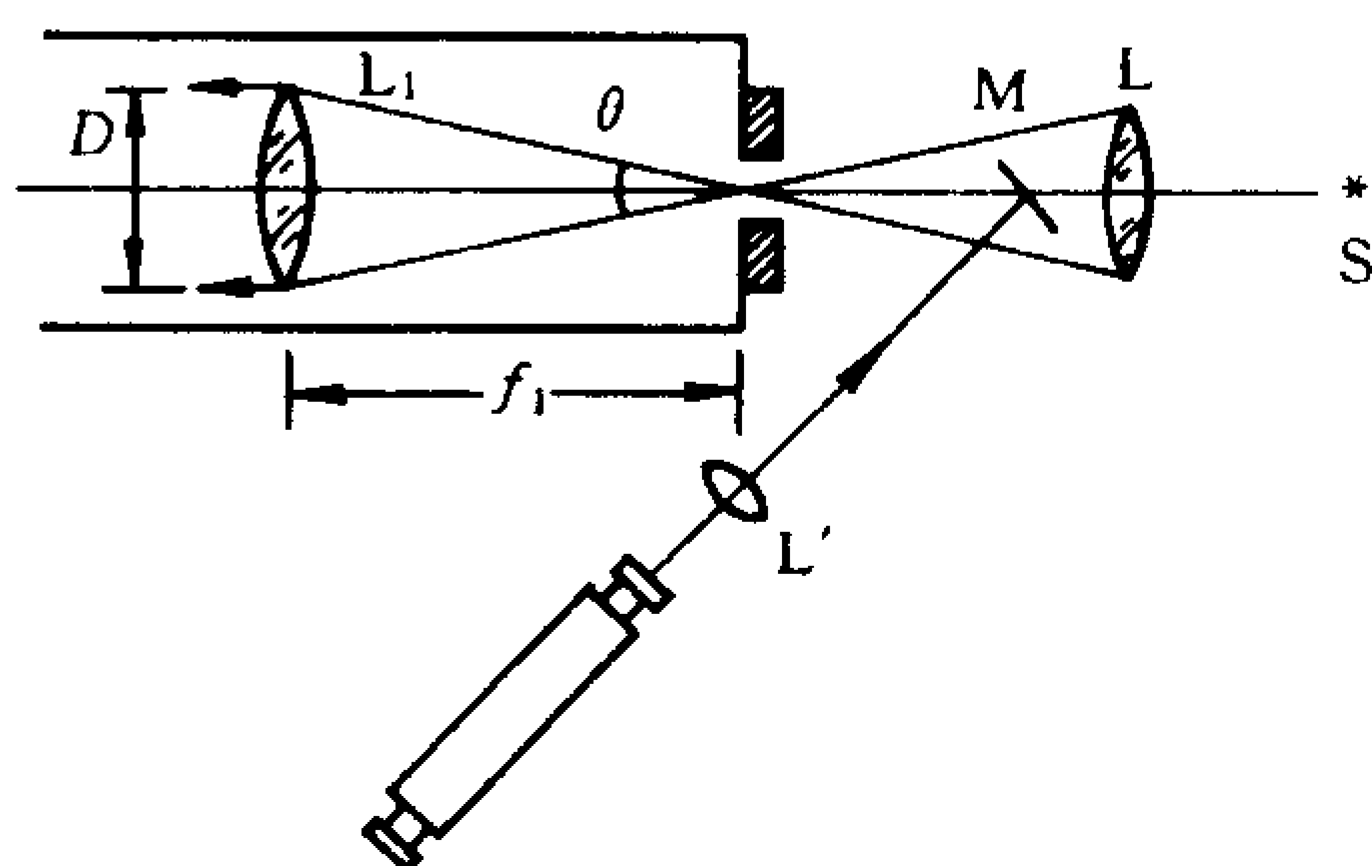


图 6－4

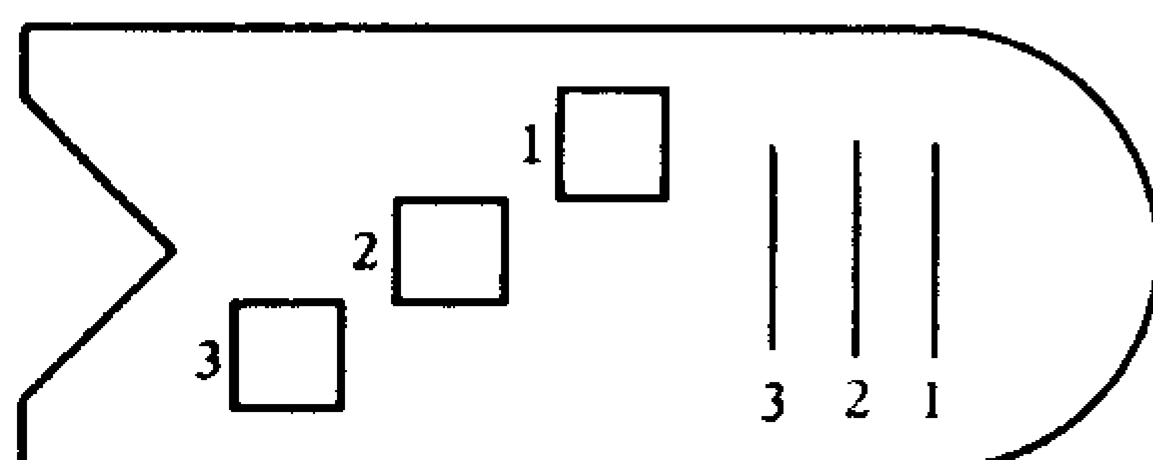


图 6－5

有三个方形小孔，第一孔的下面一条边与第二孔的上面一条边在同一直线上．光阑装在摄谱仪的狭缝前，左右移动光阑，可将其上的三条刻线中任意一条对准狭缝外壳的边缘，这时，与该刻线相对应的孔则与狭缝罩合．假如我们先用第一孔拍摄已知波长的光谱（例如汞灯的光谱），移动光阑再用第二孔拍摄待测光源（例如氦－氖激光）的光谱，第三孔拍摄已知波长的光谱（例如 He－Ne 辉光的光谱），那么在冲洗好的照相底板上就得到三列光谱，两列已知光谱的谱线与待测光谱的谱线在竖直方向恰相衔接而又不相重叠，如图 6－6 所示．（问：可否用移动底板盒代替哈脱曼光阑？）

1．将一毛玻璃放在暗匣的放底板位置处，移动暗匣，使毛玻璃上适当位置现出光谱，取下暗匣在暗室中装入底板．（问：底板

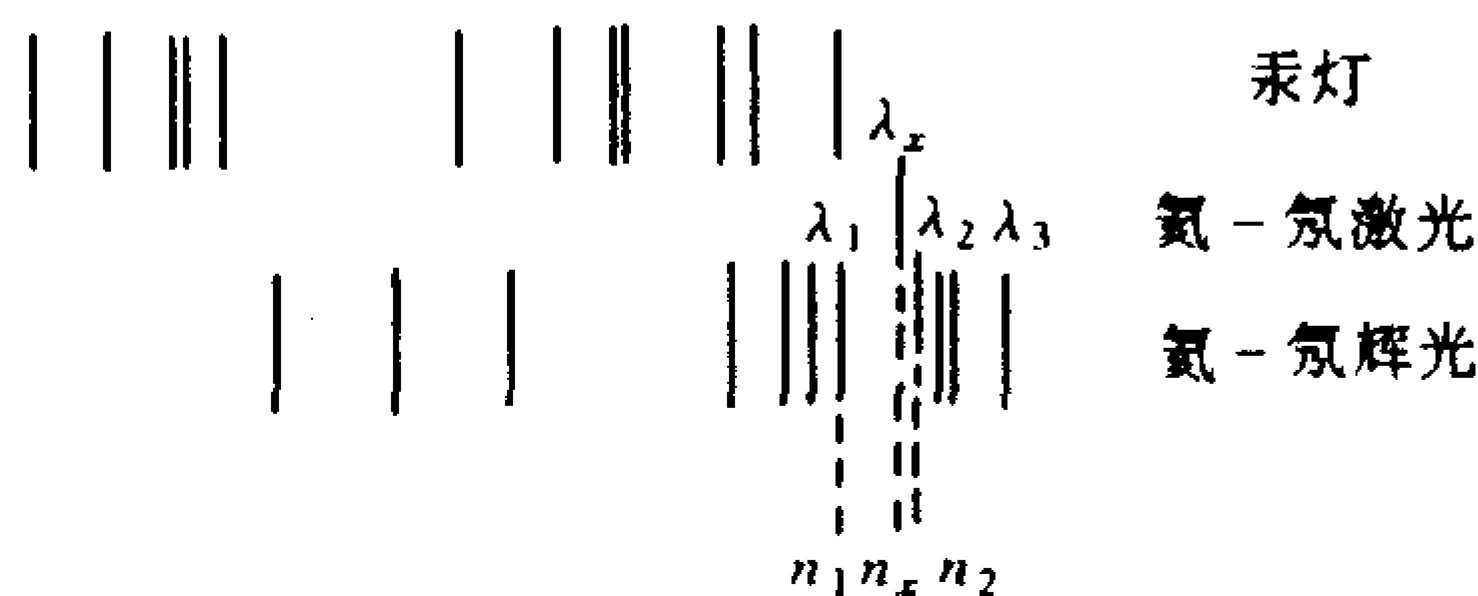


图 6－6

已知：$\lambda_1 = 626.6$ nm　　$\lambda_2 = 633.4$ nm　　$\lambda_3 = 640.2$ nm

的药膜面应在下或上？怎样在暗室中判断药膜面？）用哈脱曼光阑控制各光源的光谱．

用手操纵狭缝上的罩盖控制曝光时间，曝光时间的长短是重要的条件，要请教指导教师．（摄谱前要拉出暗匣抽板．）

如在一底板上要拍摄几组比较光谱，应预先确定各组光谱对应的暗匣的位置．

2．在拍摄比较光谱时，必须防止不同光源的光谱之间出现横向相对移动，以免引入测量误差．因此，拍摄同一组比较光谱时，光学系统及暗匣均不能移动，只能移动哈脱曼光阑．

3．在暗室中打开暗匣，按以下顺序进行冲洗：

水→显像液（时间可询问教师）→水→定像液（约 10min）→水→晾干．（问：如果先放到定像液中将有何结果？）

三、测量待测谱线的波长

棱镜光谱的线色散率在各波长处均不同，如果所取波长范围甚小，则可近似认为该范围里色散率是恒定的，即底板上谱线位置 n 和波长 λ 间是线性关系．

在靠近待测波长 λ_x 的两侧，选两条波长 λ_1、λ_2 为已知的谱线，测出三条谱线在底板上的位置 n_x、n_1 和 n_2．则可依据线性关系，从 λ_1、λ_2、n_1、n_2 和 n_x 求出 λ_x 值（此方法为内插法）．

（自己写出计算公式）．

另外选两条距 λ_x 稍远的(或在 λ_x 的同一侧的)谱线,同上测量并求 λ_x,比较其差异.

注意事项

1. 选择聚光透镜 L 的焦距和位置时,应注意保持透镜孔径对入射狭缝的张角 θ 和摄谱仪准直物镜的入射孔径(D/f'_1)相匹配的条件. 如图 6-4 所示,因为当 $\theta>\frac{D}{f'_1}$时,一部分照明光由于照射在入射孔径之外,将会在仪器内壁上漫射产生背景杂散光的干扰;而当 $\theta<\frac{D}{f'_1}$时,仪器的入射孔径未被照全,原设计的光学性能不能得到充分的发挥,降低了仪器的分辨本领.

2. 使用棱镜台的转动螺旋可调整棱镜的位置,使被拍摄的光谱段位于适中的位置.

3. 使用移测显微镜测量光谱线位置时,第一要注意聚焦,使十字丝与谱线间无视差,第二要防止回程误差.

4. 参照实验室提供的光谱图,对选作标准的 λ_1、λ_2 的波长值要核对正确.

复习思考题

1. 推导式(6-1).

2. 为何摄谱仪的底板面必须与照相系统的光轴倾斜,才能使所有谱线同时清晰?

3. 怎样测定摄谱仪的线色散?

4. 怎样拍摄叶绿素的吸收光谱?

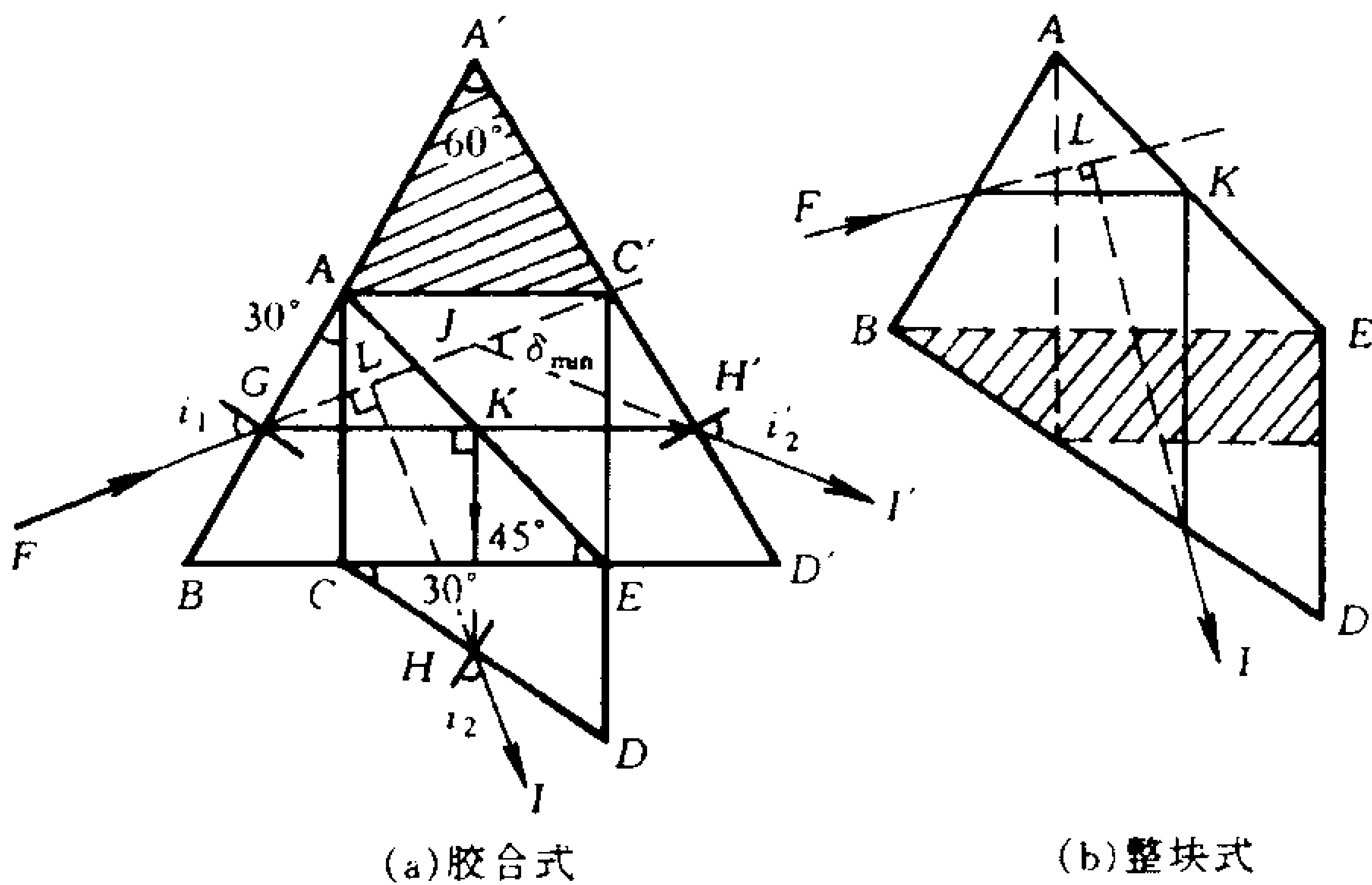
[附记]

阿贝棱镜的恒偏向特性

阿贝棱镜是由两个 30°角的折射棱镜和一个 45°角的全反射棱镜组成,它的形状在图 6-7(a)中,以粗线 *ABCDE* 表示.

我们知道,光线以最小偏向角 δ_{min}通过棱镜时,入射光线和出

射光线对于棱镜底面是对称的. 如图 6-7(a)中 $A'B'D'$ 所示棱镜,是顶角为 60°的等腰棱镜,入射线 FG 和出射线 $H'I'$ 就是对称的,在棱镜内的行进路线 GH' 则与棱镜底边平行. 由于光线以最小偏向角通过棱镜时谱线质量最好,因而一般棱镜摄谱仪和单色仪都设计成尽可能使工作波长的光线对称地通过棱镜,但由于摄谱仪的棱镜是不能转动的,因此,只能有一个波长("中间波长")的光线处于最小偏向位置. 设将图 6-7(a)所示棱镜 $A'BD'$ 沿平行于底边的 AC' 线切去其顶部(图中斜线部分),并使 AC' 等于剩下的梯形的高度 AC,光线 $FGKH'I'$ 以对称光路通过棱镜,即 GH' 与底边 BD' 平行,则$\angle i_1 = \angle i_2'$,这时的偏向角应为最小偏向角 δ_{min}. 再沿正方形 $ACEC'$ 的对角线 AE 将梯形棱镜中的 $AED'C'$



(a)胶合式 (b)整块式

图 6-7

部分切掉,并将其中的 $ED'C'$ 部分移到 EDC 的位置,这样就成了阿贝棱镜 $ABCDE$. 这时 AE 成了一个反射平面,在棱镜内通过的光线在 K 点产生全反射. C、H、D 各点分别为 C'、H'、D' 各点的像,光线现在是沿着 $FGKHI$ 进行,$\angle FLI$ 成了新的最小偏向角.

根据对称光路的几何特性可知$\angle JGK = \angle JH'K$,根据平面镜反射原理可知$\angle JH'K = \angle LHK$,因而$\angle JGK = \angle LHK$. 由于 $GK \perp KH$,因而 $GL \perp LH$,亦即 $FG \perp HI$. 对于任何波长的光线,只要

它处于最小偏向位置,新的最小偏向角就总是等于90°,所以,这种棱镜又称为90°恒偏向棱镜.这种棱镜的制作方法有两种:一种是胶合式[图6-7(a)],即由两块顶角为30°的“半棱镜”与一块直角全反射棱镜以光学接触方法胶合而成;另一种是以整块材料磨制而成的四边棱镜[图6-7(b)],它比胶合式简单,但是光线在棱镜内的光程增长,棱镜体积增大(图中阴影部分为增多部分).

实验七　单色仪的定标和滤光片光谱透射率的测定

目的

1. 了解棱镜单色仪的构造原理和使用方法；
2. 以汞灯的主要谱线为基准，对单色仪在可见光区进行定标；
3. 掌握用单色仪测定滤光片光谱透射率的方法.

仪器和用具

反射式棱镜单色仪，溴钨灯(12 V，50 W)，直流稳压电源，汞灯，硅光电池，灵敏电流计，低倍显微镜，滤光片，会聚透镜(两片)，毛玻璃.

原理

单色仪是一种分光仪器，它通过色散元件的分光作用，把一束复色光分解成它的"单色"组成. 单色仪依采用色散元件的不同，可分为棱镜单色仪和光栅单色仪两大类. 单色仪运用的光谱区很广，从紫外、可见、近红外一直到远红外. 对于不同的光谱区域，一般需换用不同的棱镜或光栅. 例如应用石英棱镜作为色散元件，则主要应用于紫外光谱区，并需用光电倍增管作为探测器；若棱镜材料用 NaCl(氯化钠)、LiF(氟化锂)或 KBr(溴化钾)等，则可运用于广阔的红外光谱区，用真空温差电偶等作为光探测器. 本实验所用玻璃棱镜单色仪仅适用于可见光区，用人眼或光电池作为光探测器.

图 7－1 所示为反射式棱镜单色仪的结构示意图，其外壳是圆形的，下方有驱动棱镜台转动的丝杆和读数鼓轮，外侧装有缝宽可调的入射狭缝 S_1 和出射狭缝 S_2. 其光学系统由下列三部分组成：

1. 入射准直系统

由入射缝 S_1 和凹面镜 M_1 组成，因 S_1 固定在 M_1 的焦面上，它使 S_1 发出的入射光束成为平行光束.

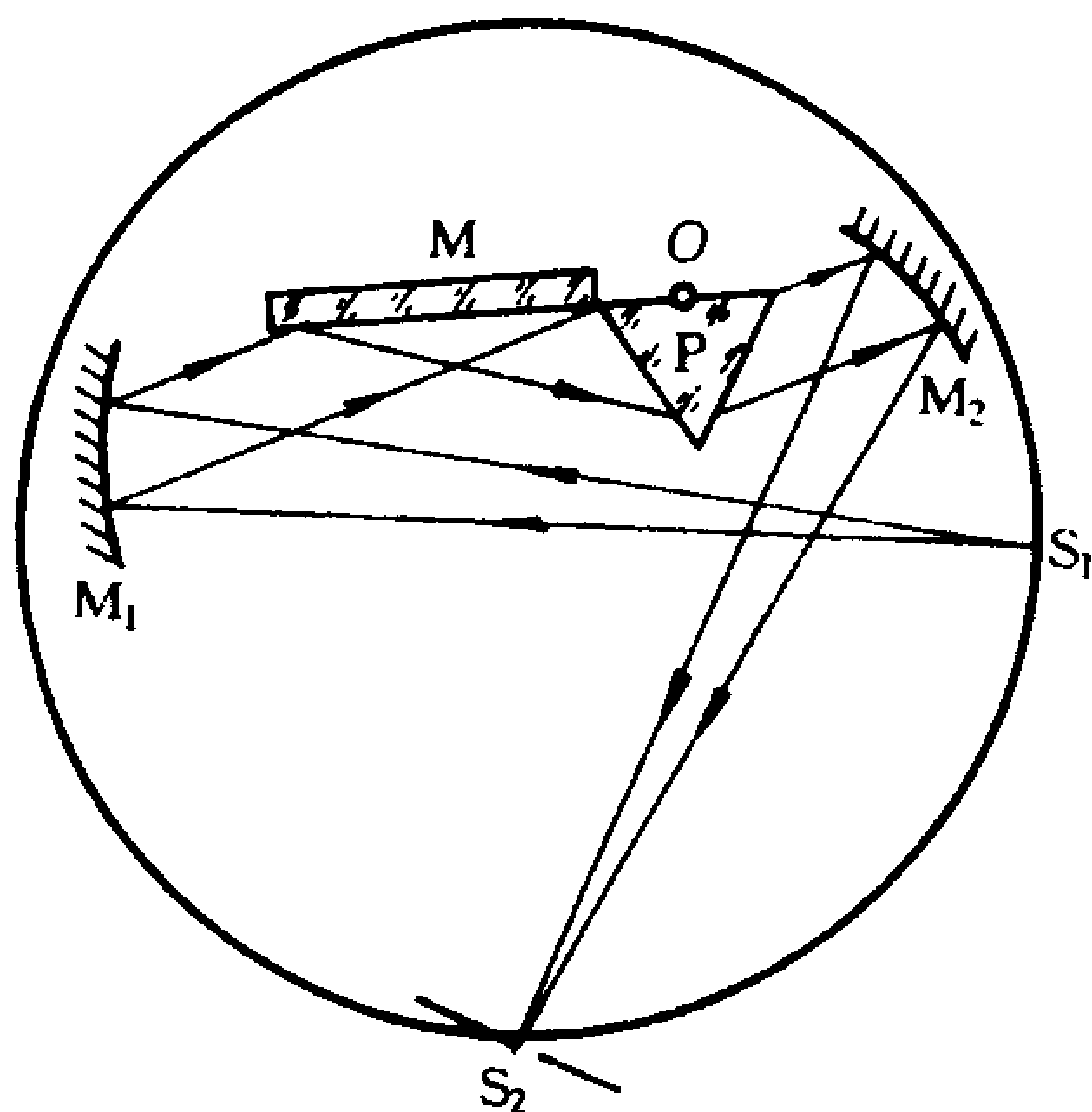


图 7－1

S_1　入射缝；M_1　准直凹面反射镜；M　平面反射镜；M_2　聚焦凹面反射镜；P　棱镜；S_2　出射缝

2．瓦兹渥斯(Wadsworth)色散系统

由玻璃棱镜 P 和平面镜 M 联合组装成一整体，安装在同一转台上，可以绕通过 O 点垂直于图面的轴线(棱镜顶角的等分面和底面的交线)转动．该系统的特点是平行光束通过后，以最小偏向角出射的单色光仍平行于原入射光．即该系统为恒偏向色散装置．

3．出射聚光系统

由凹面镜 M_2 和出射缝 S_2 组成，它将色散后沿不同方向传播的单色平行光经 M_2 反射后，会聚在 M_2 的焦面，即出射缝 S_2 的平面上，因 S_2 缝宽较小，从 S_2 输出的是波段很窄的光，通常称为单色光.

随着棱镜台绕 O 轴转动，以最小偏向角通过棱镜的光束的波长也跟着改变，当最小偏向角由小变大时，从 S_2 输出的单色光的波长将依次由长变短.

1．单色光束的光谱宽度

若入射光从 S_1 射入，入射缝宽为 a，则狭缝 S_1 在出射缝 S_2 的光谱面上成像，其像宽为 $L_1 = \frac{f_2}{f_1} \cdot a$. 式中 f_1 为准直物镜 M_1 的焦距，f_2 为聚光物镜 M_2 的焦距. 设光谱平面的线色散为 $dl/d\lambda$，则出射光的光谱宽度 $\Delta_1 \lambda$ 为

$$\Delta_1 \lambda = \frac{d\lambda}{dl} \cdot \frac{f_2}{f_1} \cdot a \tag{7-1}$$

因棱镜的线色散为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot f_1 \tag{7-2}$$

式中 A 为棱镜顶角，n 为棱镜材料的折射率.

$$\Delta_1 \lambda = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2\sin\frac{A}{2}} \cdot \frac{d\lambda}{dn} \cdot \frac{a}{f_1} \cdot \frac{f_2}{f_1}$$

同样讨论，因出射缝宽度 a' 引起的光谱宽度 $\Delta_2 \lambda$ 为

$$\Delta_2 \lambda = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2\sin\frac{A}{2}} \cdot \frac{d\lambda}{dn} \cdot \frac{a'}{f_2} \cdot \frac{f_2}{f_1}$$

因此，出射光光谱宽度 $\Delta\lambda$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \Delta_1 \lambda + \Delta_2 \lambda \\ &= \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}}{2\sin\frac{A}{2}} \cdot \frac{d\lambda}{dn} \cdot \left(\frac{a}{f_1} + \frac{a'}{f_2}\right) \cdot \frac{f_2}{f_1} \end{aligned} \tag{7-3}$$

由上式可见，从单色仪输出的中心波长为 λ 的单色光，其出射光光谱宽度 $\Delta\lambda$ 与狭缝的角宽度之和成正比；和棱镜对该波长

的角色散成反比．以棱镜分光为例，当缝宽一定时，因紫光区具有较大的色散，因而紫光区较红光区输出的单色化程度要好．但由于实际的光学系统，总存在衍射效应，各种像差，谱线弯曲和光谱散焦的影响，都将使出射光的光谱范围进一步增宽，即降低了输出光的单色化程度．

应该指出，对于多数单色仪，有 $f_1 = f_2$，故式(7－3)可简化为

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dl}(a + a') \qquad (7-4)$$

2．单色光输出的强度

在光源强度一定时，由单色仪输出的光谱宽度为 $\Delta\lambda$ 的单色光强度的大小与仪器光学元件的性质有关．例如光学系统表面的反射、散射、光学元件的吸收以及光波的偏振态，都会使输出光的强度降低，使用时总希望单色仪的光谱透过率要高，其具体数值只能由实验确定．

显然，增大狭缝的宽度，可以增加出射光的强度，但同时出射光束的光谱宽度 $\Delta\lambda$ 也将增大．由于光谱宽度正比于狭缝的角宽度之和，而单色仪的出射光通量却正比于它们的乘积．当 $\Delta\lambda$ 值确定后，即 $a/f_1 + a'/f_2 =$ 常数时，可以证明，单色仪出射最大光通量的条件为

$$\frac{a}{f_1} = \frac{a'}{f_2} \qquad (7-5)$$

上式表明，当出射缝宽和入射缝的像有同样宽度时，出射光强度最大．如果 $f_1 = f_2$，则上式简化为 $a = a'$．

另外，若光谱宽度 $\Delta\lambda$ 增加 n 倍，则出射光通量将增加 n^2 倍．当 $\Delta\lambda$ 一定时，出射光通量与棱镜的色散有关．对于不同波长的光输出，因色散不同，所以狭缝的宽度应随着改变，才能获得适当的输出光强度．

单色仪能输出不同波长的单色光，是依赖于棱镜台的转动才得实现．棱镜台的位置是由鼓轮刻度标志的，而鼓轮刻度的每一

数值都和一定波长的单色光输出相对应. 因此,必须制作单色仪的鼓轮读数和对应光波波长的关系曲线——定标曲线(又称色散曲线),一旦鼓轮读数确定,便可从定标曲线上查知输出单色光的中心波长.

练习一 单色仪的定标

单色仪出厂时,一般都附有定标曲线的数据或图表供查阅,但是经过长期使用或重新装调后,其数据会发生改变,这就需要重新定标,以对原数据进行修正.

单色仪定标曲线的定标是借助于波长已知线光谱光源来进行的. 为了获得较多的点,必须有一组光源. 通常采用汞灯、氢灯、钠灯、氖灯以及用铜、锌、铁做电极的弧光光源等.

本实验选用汞灯作为已知线光谱的光源,在可见光区域(400 ~760 nm)进行定标. 在可见光波段,汞灯主要谱线的相对强度和波长如图 7-2 及表 7-1 所示.

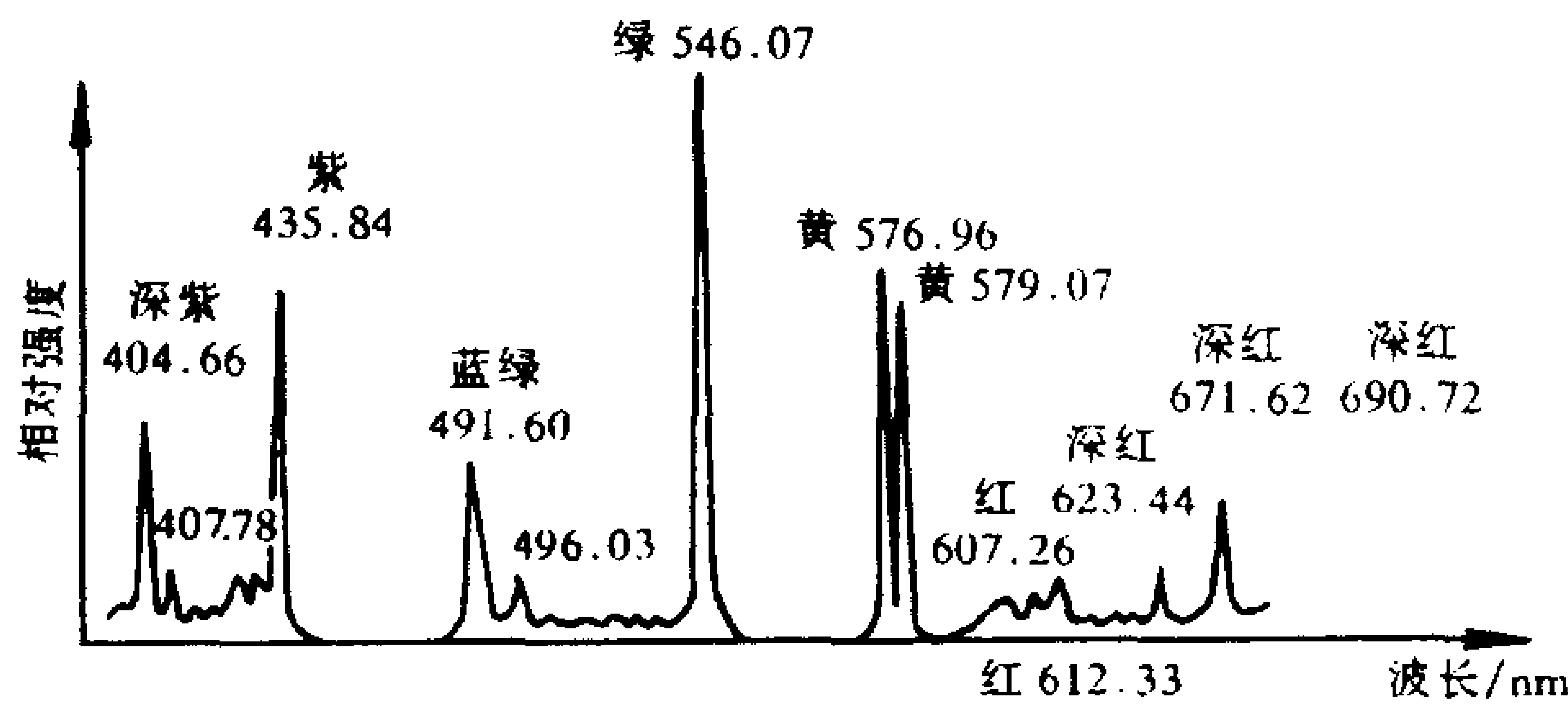


图 7-2

实验内容

1. 观察入射狭缝和出射狭缝的结构,了解缝宽的调节和读数以及狭缝使用时的注意事项. 因为两个缝的宽度直接影响出射光

的强度和单色性，所以必须根据需要适当选择缝宽.

表 7-1 汞灯主要光谱线波长表

颜色	波长/nm	强度
紫色	Δ404.66	强
	Δ407.78	中
	410.81	弱
	433.92	弱
	434.75	中
	Δ435.84	强
蓝绿色	Δ491.60	强
	Δ496.03	中
绿色	535.41	弱
	536.51	弱
	Δ546.07	强
	567.59	弱
黄色	Δ576.96	强
	Δ579.07	强
	585.92	弱
	589.02	弱
橙色	Δ607.26	弱
	Δ612.33	弱
红色	Δ623.44	中
深红色	Δ671.62	中
	Δ690.72	中
	708.19	弱

2. 在入射缝前放置汞灯，用以照射入射狭缝. 为了充分利用进入单色仪的光能，光源应放置在入射准直系统（S_1 和 M_1）的光轴上. 为此，将入射狭缝和出射狭缝开大，将光源移至 S_1 前半米以外的位置，从出射狭缝处朝单色仪内观察，可看见光源的清晰像，调节光源的位置，使光源的像正好位于 M_2 的中央.

使入射缝宽减小到 50 μm，再在光源与入射缝之间加入聚光

透镜，适当选择透镜的焦距和口径，以使光源既成像于 S_1 上，又能够使其相对孔径与仪器的相对孔径(1:7)相等．这样，既可使出射谱线获得最大的亮度，又减少了仪器内部的杂散光．调节聚光透镜的位置，并用一块毛玻璃置于出射狭缝处，使毛玻璃上呈现的谱线最明亮．至此，光源已调整完毕．

3．将低倍显微镜置于出射狭缝处，对出射狭缝 S_2 的刀口进行调焦，使显微镜视场中观察到的汞谱线最清晰．为使谱线尽量细锐并有足够的亮度，应使入射缝 S_1 尽可能小，出射缝 S_2 可适当大些．根据可见光区汞灯主要谱线的波长、颜色、相对强度和谱线间距辨认谱线，并选表 7－1 中打"Δ"者为定标谱线．

4．使显微镜的十字叉丝对准出射狭缝的中心位置，缓慢地转动鼓轮，直到各谱线中心依次对准显微镜的叉丝时，分别记下鼓轮读数(L)与其所对应的波长(λ)，测量几次，取其平均值．

5．以光谱线波长(λ)为横坐标，以鼓轮读数(L)为纵坐标画曲线，即得单色仪的定标曲线．(问：能简略说明制作定标曲线的过程吗？)

练习二　用单色仪测定滤光片的光谱透射率

当波长为 λ、光强为 $I_0(\lambda)$的单色光束垂直入射于透明物体上时，由于物体对不同波长的光的透射能力不一样，所以透过物体后的光强 $I_T(\lambda)$也不一样．通常定义物体的光谱透射率 $T(\lambda)$为

$$T(\lambda)=\frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \tag{7-6}$$

若以白炽灯为光源，出射的单色光由光电池接收，用灵敏电流计显示其读数，则出射的单色光所产生的光电流 $i_0(\lambda)$与入射光强 $I_0(\lambda)$、单色仪的光谱透射率 $T_0(\lambda)$和光电池的光谱灵敏度 $S(\lambda)$成正比，即

$$i_0(\lambda) = kI_0(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda) \tag{7-7}$$

式中 k 为比例系数. 若将一光谱透射率为 $T(\lambda)$ 的透明物体(滤光片)插入被测光路,则相应的光电流可表示为

$$\begin{aligned} i_T(\lambda) &= kI_T(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda) \\ &= kI_0(\lambda)T(\lambda)T_0(\lambda)S(\lambda) \end{aligned} \tag{7-8}$$

由(7-7)、(7-8)两式可得

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \frac{i_T(\lambda)}{i_0(\lambda)} \tag{7-9}$$

本练习要求用单色仪测定滤光片的光谱透射率 $T(\lambda)$,作出 $T(\lambda)-\lambda$ 曲线,并求出光谱透射率的半宽度——透射率降到最大值的一半的波长范围.

实验内容

1. 按图7-3所示安排好实验仪器. 光源用白炽灯,它的发射光谱是连续光谱. 选择适当的缝宽(约0.1 mm).

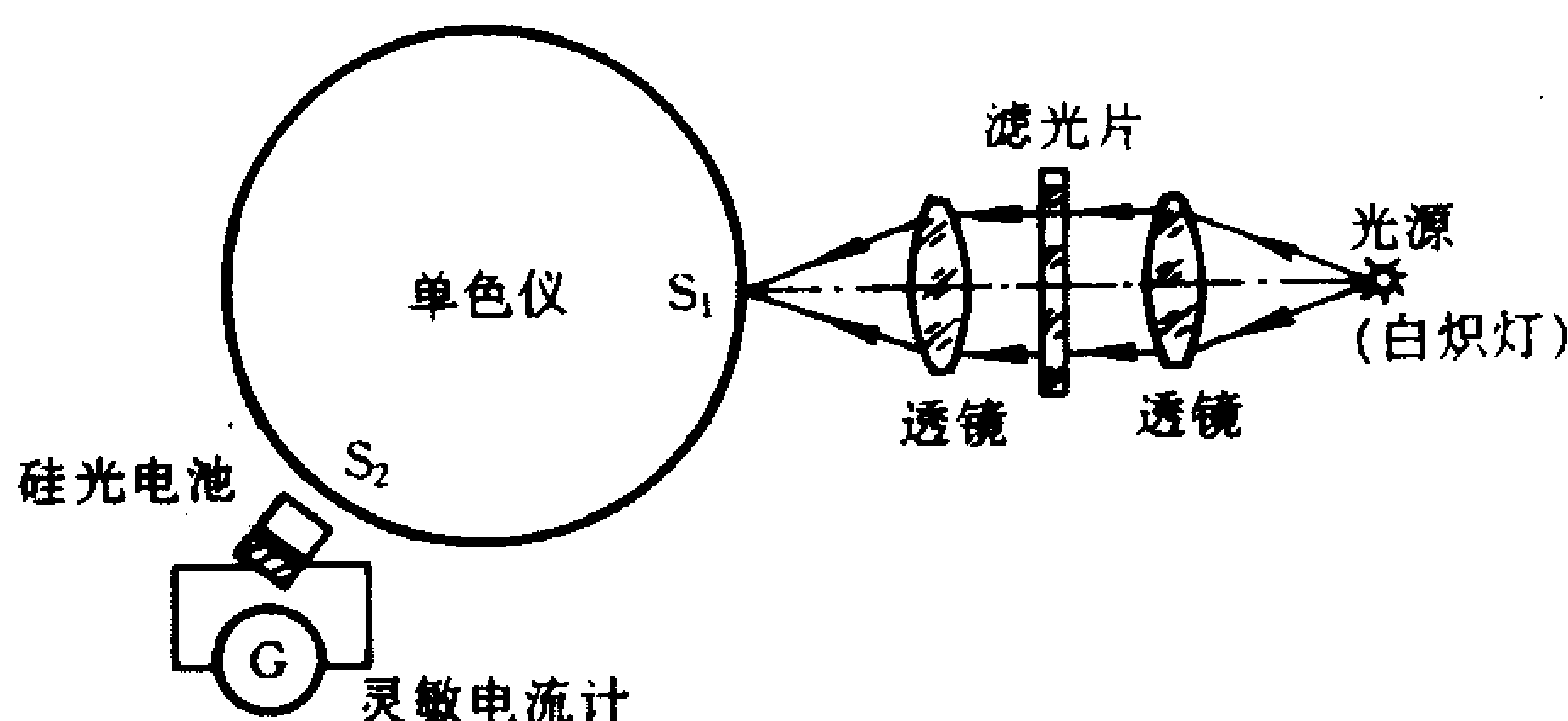


图7-3

2. 转动鼓轮,使单色仪输出中心波长为690 nm. 不加滤光片,记录电流计偏转格数 $i_0(\lambda)$,加上滤光片时偏转为 $i_T(\lambda)$. 求滤光片对该波长的透射率 $T(\lambda)$.

3. 继续转动鼓轮,使输出中心波长从690 nm向紫光区移动,每隔一定的波长间隔(约20 nm)测量一次,求出透射率 $T(\lambda)$ 并记

录波长 λ.

4. 作 $T(\lambda)-\lambda$ 曲线,求出光谱透射率的半宽度.

注意事项

1. 狭缝是单色仪的精密元件,要特别小心使用.旋转测微螺旋时,操作要慢些,缩小狭缝宽度时,切勿使狭缝的二刀口相碰,即不许使螺旋读数小于零!

2. 根据要输出的单色光的波长和光谱宽度,由式(7-4)算出合适的缝宽,取 $a=a'$,使输出获得最大的光通量.

3. 入射缝 S_1 的光经棱镜折射后,在出射缝 S_2 平面上形成 S_1 的像是弯曲的,定标时显微镜的叉丝应对准弯曲谱线的中部.

4. 因棱镜色散不均匀和探测器光谱灵敏度的限制,测定透明介质的光谱透过率时,当测量从长波段向短波段改变时,应适当增大缝宽,使电流计有较大的偏转.

应选取低内阻的灵敏电流计.

5. 注意防止强光照射光电池.

[附记]

在光谱能量(光强)测量中,光源发出的光经单色仪分光后,出射的单色光能量一般都很小,如用光电探测器(如硅光电池)直接连于电流计,由于电流极小,将显示不出读数,因而常在光源与单色仪入射狭缝之间加一个所谓斩波器的装置(有时称为光调制器,图7-4).斩波器是一个有齿的转盘(图7-4(b)),由调速电动机带动,当齿轮转动时,光束周期性地被齿轮上的齿所切割(遮光),因此在单色仪出射狭缝后的探测器上接收到的是一个经过调制的断续光讯号.可用硅光电三极管(或光电池)将这个讯号转换成交变的电讯号,并用交流放大器放大后,用晶体管毫伏表测量其讯号强度(毫伏数),它是正比于入射光强的.为了防止外界的干扰,还可对斩波器的频率进行选频放大,使放大器输出讯号更为稳定.测定滤光片光谱透射率时也可采用斩波器,这时整个实验装置如图7-4(a)所示.

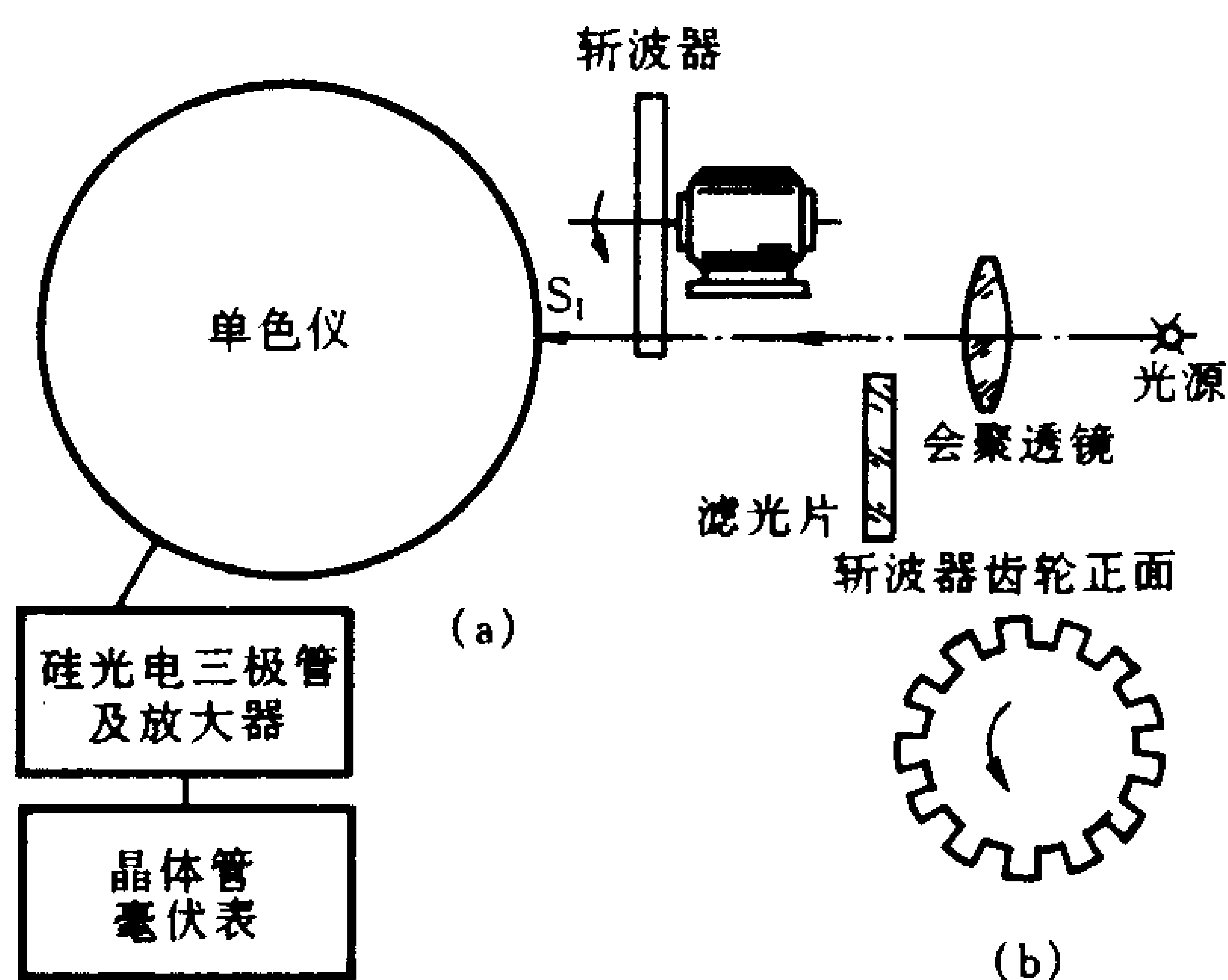


图 7－4

复习思考题

1. 讨论单色仪的入射缝和出射缝的宽度对出射光单色性的影响，并证明出射光谱宽度 $\Delta\lambda=\dfrac{a+a'}{\dfrac{dl}{d\lambda}}$，其中 a、a' 分别为入射缝和出射缝的宽度，$\dfrac{dl}{d\lambda}$ 为棱镜的线色散.

2. 如发现单色仪定标曲线上相对于已知波长 λ 的鼓轮刻度 L 偏离了 ΔL，能否将原定标曲线平移 ΔL 后继续使用，为什么？

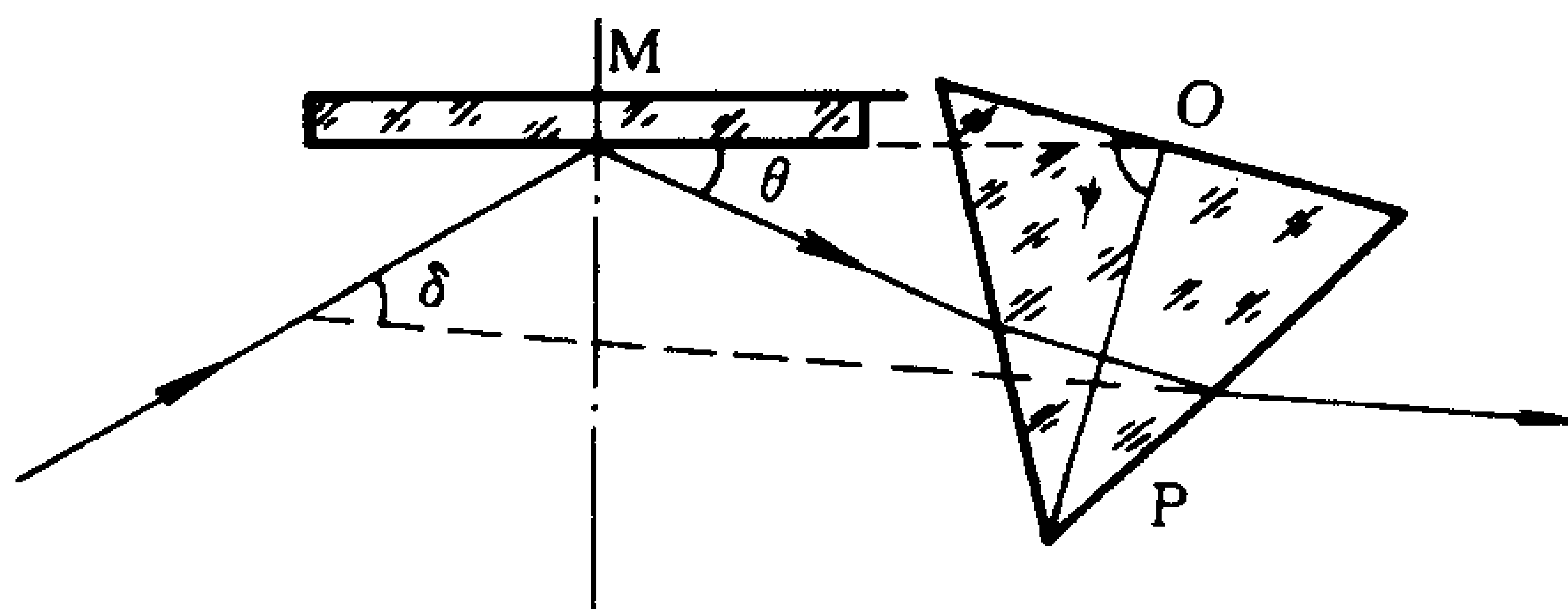


图 7－5

3. 证明瓦兹渥斯色散装置(图 7－5)的光束恒偏向的特性. 即 $\delta=\pi-2\psi$.

4. 如何测定单色仪的线色散 $dl/d\lambda$？

实验八　用双棱镜干涉测钠光波长

目的

1. 观察双棱镜产生的双光束干涉现象，进一步理解产生干涉的条件；

2. 学会用双棱镜测定光波波长.

仪器和用具

双棱镜，可调狭缝，辅助透镜（两片），测微目镜，光具座，白屏，单色光源（钠灯）.

原理

如果两列频率相同的光波沿着几乎相同的方向传播，并且这两列光波的位相差不随时间而变化，那么在两列光波相交的区域内，光强的分布不是均匀的，而是在某些地方表现为加强，在另一些地方表现为减弱（甚至可能为零），这种现象称为光的干涉.

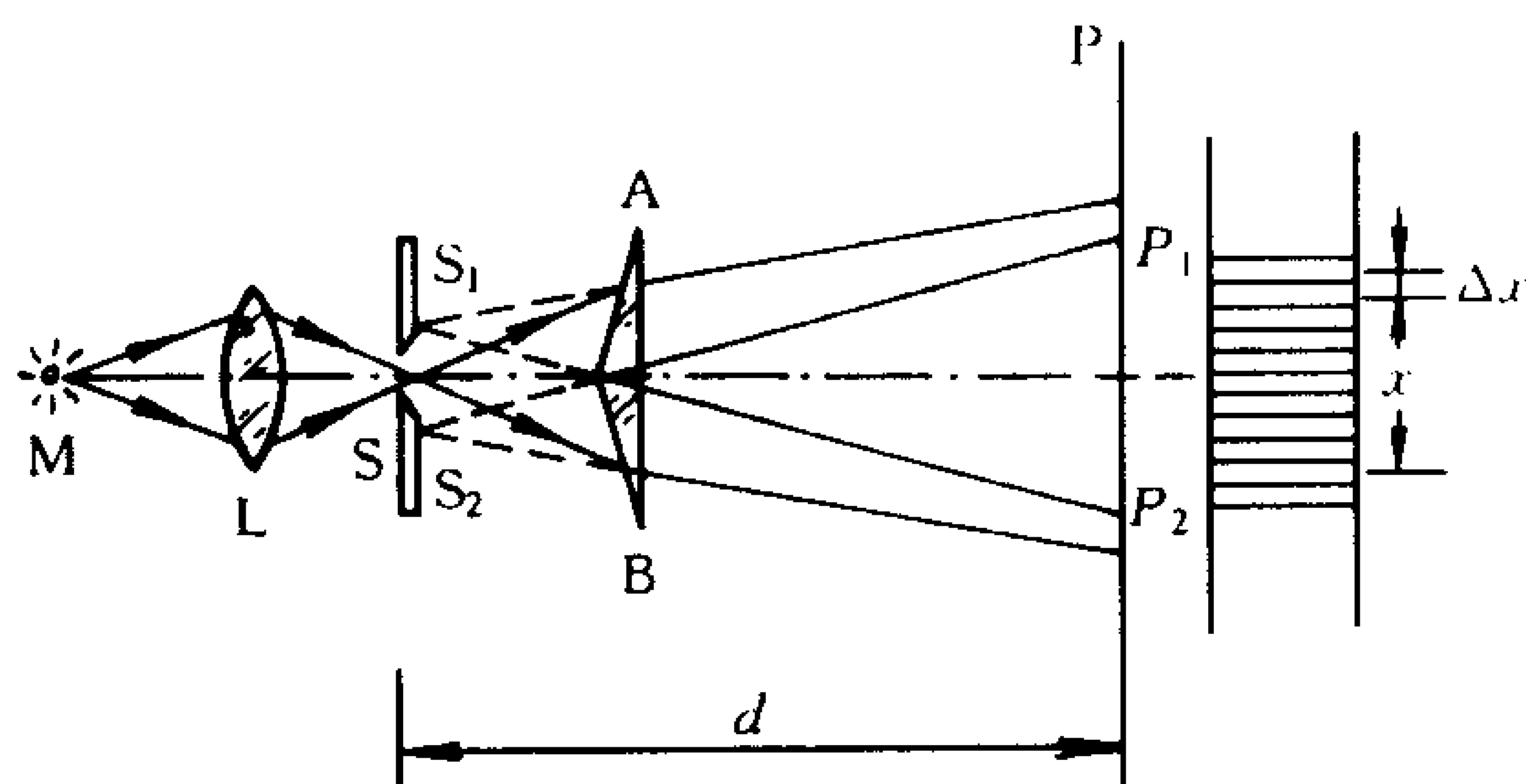


图 8－1

菲涅耳利用图 8－1 所示装置，获得了双光束的干涉现象. 图中双棱镜 AB 是一个分割波前的分束器，它的外形结构如图 8－2

所示. 将一块平玻璃板的上表面加工成两楔形板,端面与棱脊垂直,楔角 A 较小(一般小于 $1°$). 从单色光源 M 发出的光波经透镜 L 会聚于狭缝 S,使 S 成为具有较大亮度的线状光源. 当狭缝 S 发出的光波投射到双棱镜 AB 上时,经折射后,其波前便分割成两部分,形成沿不同方向传播的两束相干柱波. 通过双棱镜观察这两束光,就好像它们是由虚光源 S_1 和 S_2 发出的一样,故在两束光相互交叠区域 P_1P_2 内产生干涉. 如果狭缝的宽度较小且双棱镜的棱脊和光源狭缝平行,便可在白屏 P 上观察到平行于狭缝的等间距干涉条纹.

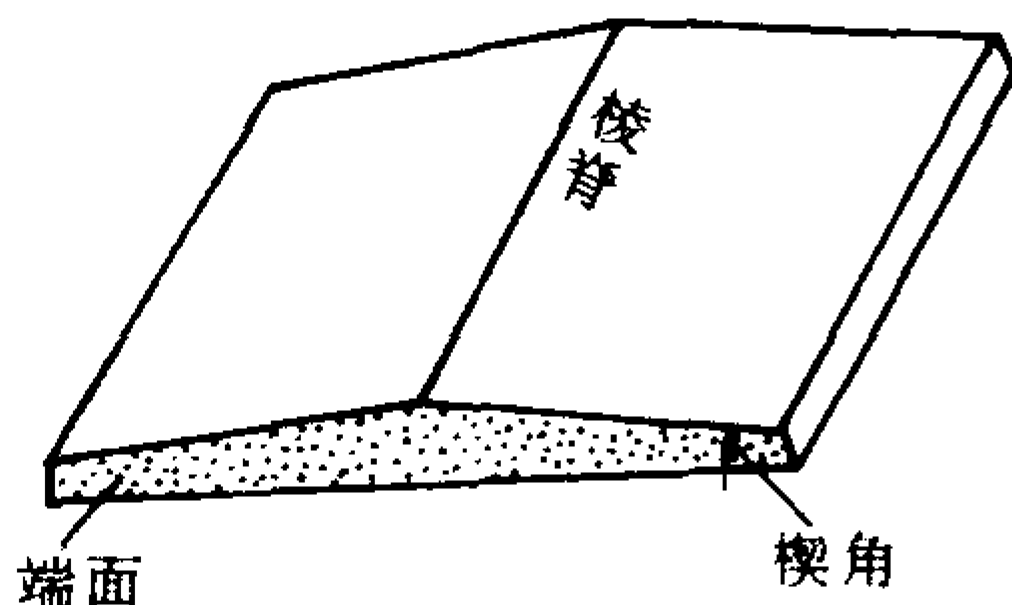


图 8－2

设 d' 代表两虚光源 S_1 和 S_2 间的距离,d 为虚光源所在的平面(近似地在光源狭缝 S 的平面内)至观察屏 P 的距离,且 $d' \ll d$,干涉条纹宽度为 Δx,则实验所用光波波长 λ 可由下式表示:

$$\lambda = \frac{d'}{d}\Delta x \qquad (8-1)$$

上式表明,只要测出 d'、d 和 Δx,就可算出光波波长. 这是一种光波波长的绝对测量方法,通过使用简单的米尺和测微目镜,进行毫米量级的长度测量,便可推算出微米量级的光波波长.

由于干涉条纹宽度 Δx 很小,必须使用测微目镜进行测量. 两虚光源间的距离 d',可用一已知焦距为 f' 的会聚透镜 L′置于双棱镜与测微目镜之间(图 8－3),由透镜两次成像法求得. 只要使测微目镜到狭缝的距离 $d > 4f'$,前后移动透镜,就可以在 L′的两个不同位置上从测微目镜中看到两虚光源 S_1 和 S_2 经透镜所成的实像 S_1' 和 S_2',其中之一组为放大的实像,另一组为缩小的实像. 如果分别测得二放大像的间距 d_1 和二缩小像的间距 d_2,则根据下式

$$d' = \sqrt{d_1 d_2} \tag{8-2}$$

即可求得两虚光源之间的距离 d'.

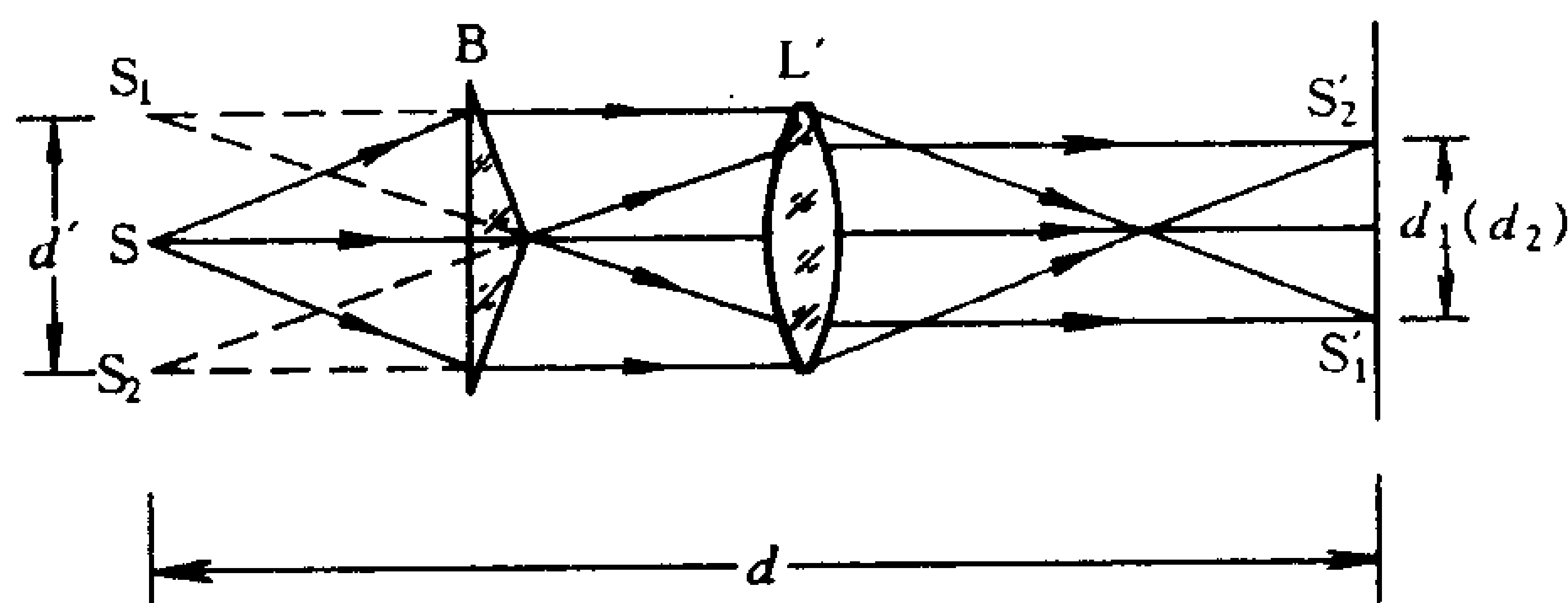


图 8-3

实验内容

1. 调节共轴

(1) 将单色光源 M、会聚透镜 L、狭缝 S、双棱镜 AB 与测微目镜 P,按图 8-1 所示次序放置在光具座上,用目视粗略地调整它们中心等高、共轴,并使双棱镜的底面与系统的光轴垂直,棱脊和狭缝的取向大体平行.

(2) 点亮光源 M,通过透镜照亮狭缝 S,用手执白纸屏在双棱镜后面检查:

经双棱镜折射后的光束,有否叠加区 P_1P_2(应更亮些)?

叠加区能否进入测微目镜?

当白屏移动时叠加区是否逐渐向左、右(或上、下)偏移? 根据观测到的现象,作出判断,再进行必要的调节(共轴).

2. 调节干涉条纹

(1) 减小狭缝宽度(以提高光源的空间相干性),一般情况下可从测微目镜观察到不太清晰的干涉条纹.

(2) 绕系统光轴缓慢地向左或右旋转双棱镜 AB,将显现出清晰的干涉条纹. 这时棱镜的棱脊与狭缝的取向严格平行.

(3) 为便于测量，在看到清晰的干涉条纹后，应将双棱镜或测微目镜前后移动，使干涉条纹的宽度适当. 同时只要不影响条纹的清晰度，可适当增加缝宽，以保持干涉条纹有足够的亮度.

双棱镜和狭缝的距离不宜过小，因为减小它们的距离，S_1、S_2间距也将减小，这对 d' 的测量不利.

3. 测量与计算

(1) 用测微目镜测量干涉条纹的宽度 Δx. 为了提高测量精度，可测出 n 条(10～20 条)干涉条纹的间距，再除以 n，即得 Δx. 测量时，先使目镜叉丝对准某亮纹的中心，然后旋转测微螺旋，使叉丝移过 n 个条纹，读出两次读数. 重复测量几次，求出 Δx.

(2) 用米尺量出狭缝到测微目镜叉丝平面的距离 d，测量几次，取其平均值.

(3) 用透镜两次成像法测两虚光源的间距 d'. 保持狭缝与双棱镜原来的位置不变(问：为什么不许动？移动测微目镜可否？)在双棱镜和测微目镜之间放置一已知焦距为 f' 的会聚透镜 L′，移动测微目镜使它到狭缝的距离大于 $4f'$，分别测得两次清晰成像时实像的间距 d_1、d_2. 各测几次，取其平均值，再计算 d' 值.

(4) 用所测得的$\overline{\Delta x}$、$\bar{d}'$、d 值，求出光源的光波波长 λ.

(5) 计算波长测量值的标准不确定度.（见本书 36～37 页.）

注意事项

1. 使用测微目镜时，首先要确定测微目镜读数装置的分格精度；要注意防止回程误差；旋转读数鼓轮时动作要平稳、缓慢；测量装置要保持稳定.

2. 在测量光源狭缝至观察屏的距离 d 时，因为狭缝平面和测微目镜的分划板平面均不和光具座滑块的读数准线共面，必须引入相应的修正(例如 GP－78 型光具座，狭缝平面位置的修正量为 42.5 mm, MCU － 15 型测微目镜分划板平面的修正量为 27.0 mm)，否则将引进较大的系统误差.（问：能否自己测出此修

正量?)

3. 测量 d_1、d_2 时,由于透镜像差的影响,实像 S_1' 和 S_2' 的位置确定不准,将给 d_1、d_2 的测量引入较大误差,可在透镜 L′上加一直径约 1 cm 的圆孔光阑(用黑纸)增加 d_1、d_2 测量的精确度.(可对比一下加或不加光阑的测量结果.)

复习思考题

1. 双棱镜和光源之间为什么要放一狭缝?为什么缝要很窄才可以得到清晰的干涉条纹?

2. 试证明公式 $d' = \sqrt{d_1 d_2}$.

[附记]

有的双棱镜的干涉条纹的强度分布,显著有附加的光强,这时如紧靠棱脊拉一细线(平行棱脊)则附加的光强将消失,即附加光强和棱脊有关. 可参照直边衍射去分析.

实验九　用牛顿环干涉测透镜曲率半径

目的

1. 掌握用牛顿环测定透镜曲率半径的方法；
2. 通过实验加深对等厚干涉原理的理解.

仪器和用具

牛顿环仪，钠灯，玻璃片(连支架)，移测显微镜.

牛顿环仪是由待测平凸透镜(凸面曲率半径约为 200～700 cm)L 和磨光的平玻璃板 P 叠合装在金属框架 F 中构成(图 9－1). 框架边上有三个螺旋 H，用以调节 L 和 P 之间的接触，以改变干涉环纹的形状和位置. 调节 H 时，螺旋不可旋得过紧，以免接触压力过大引起透镜弹性形变，甚至损坏透镜.

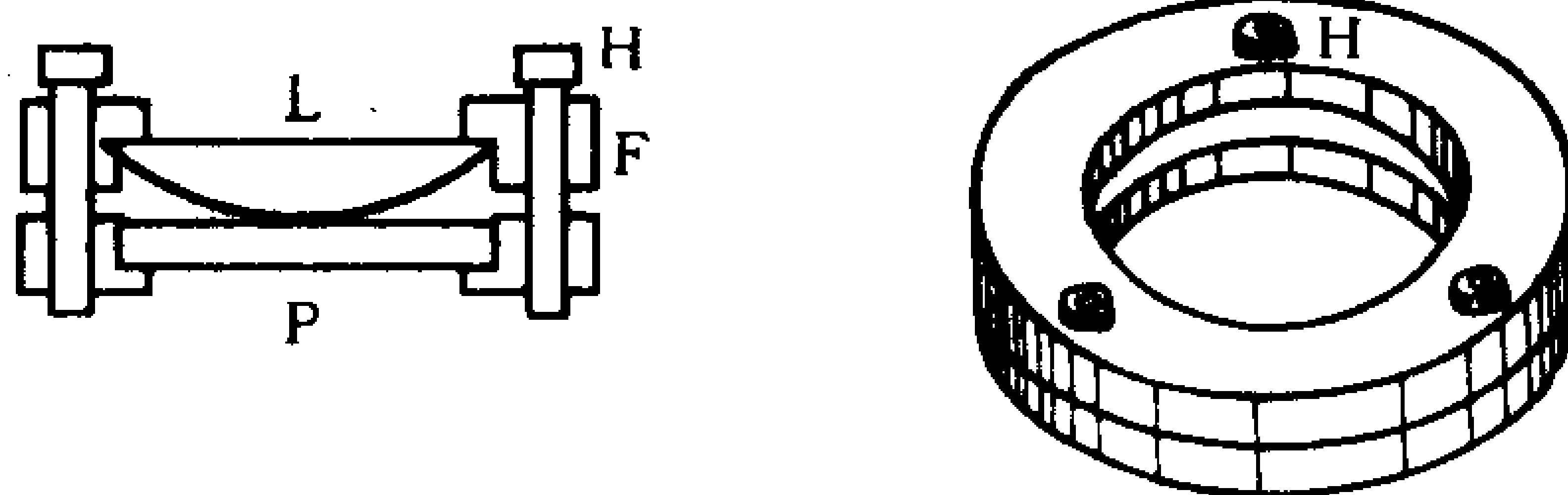


图 9－1

原理

当一曲率半径很大的平凸透镜的凸面与一磨光平玻璃板相接触时，在透镜的凸面与平玻璃板之间将形成一空气薄膜，离接触点等距离的地方，厚度相同. 如图 9－2 所示，若以波长为 λ 的单色平行光投射到这种装置上，则由空气膜上下表面反射的光波将互相干涉，形成的干涉条纹为膜的等厚各点的轨迹，这种干涉是一种

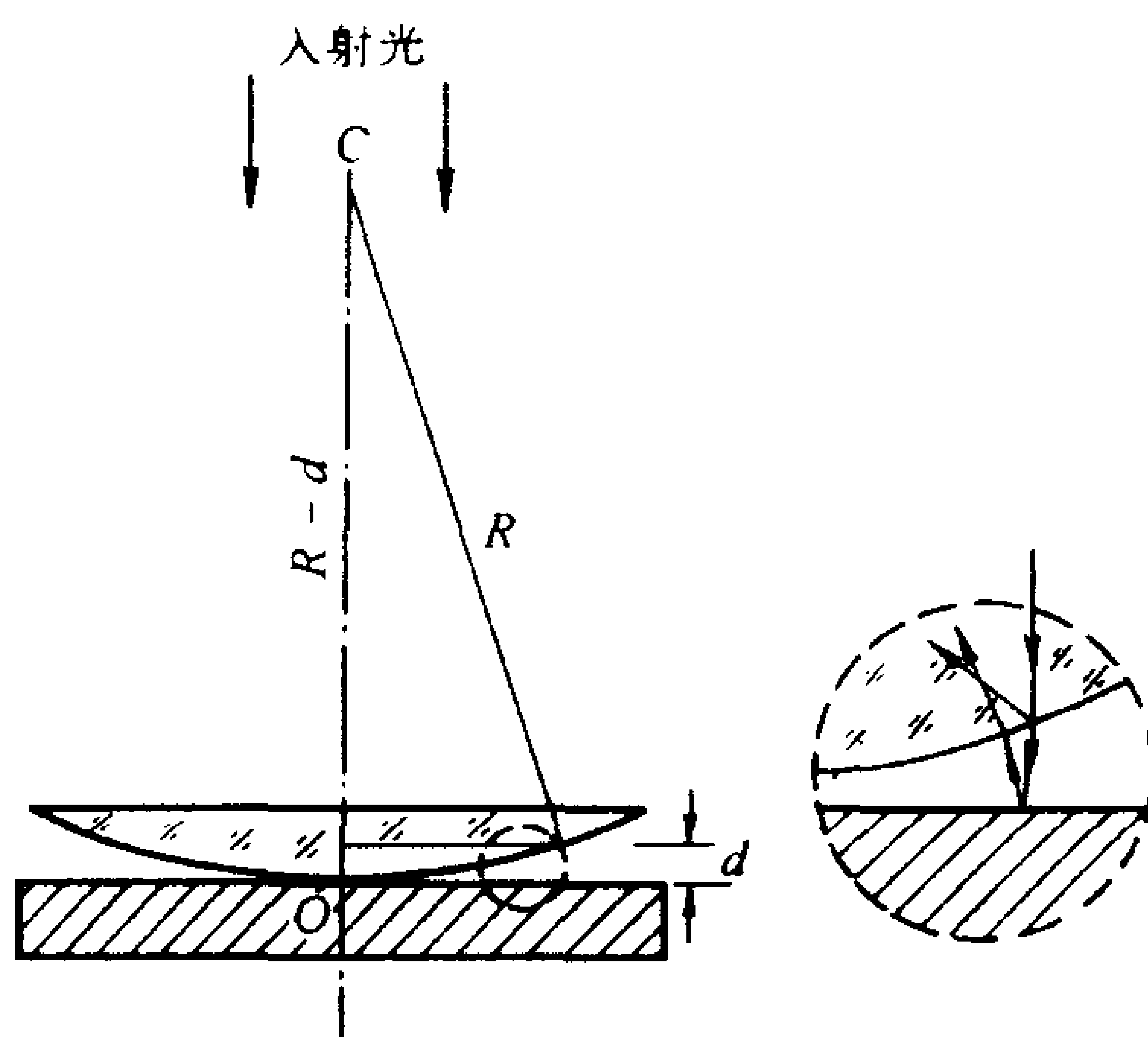


图 9-2

等厚干涉. 在反射方向观察时,将看到一组以接触点为中心的亮暗相间的圆环形干涉条纹,而且中心是一暗斑(图 9-3(a));如果在透射方向观察,则看到的干涉环纹与反射光的干涉环纹的光强分布恰成互补,中心是亮斑,原来的亮环处变为暗环,暗环处变为亮环(图 9-3(b)),这种干涉现象最早为牛顿所发现,故称为牛顿环.

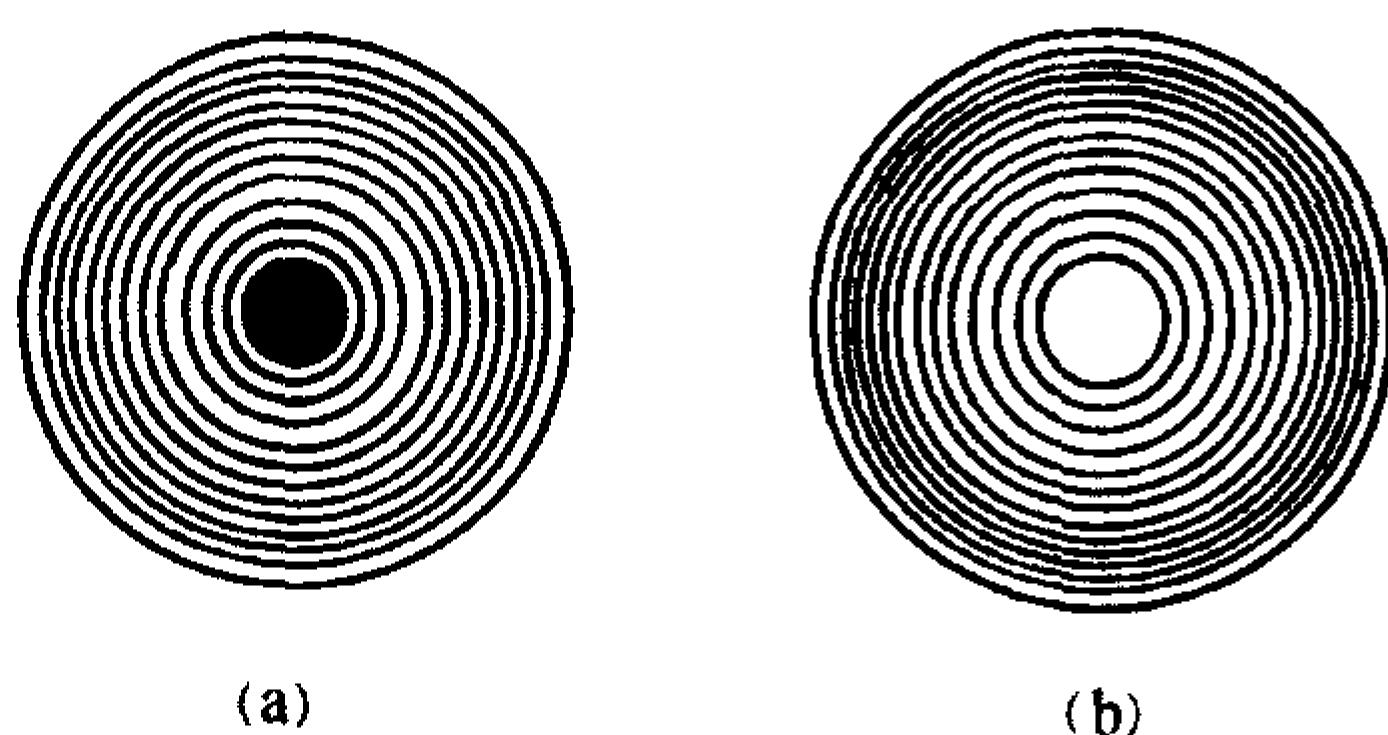


图 9-3

设透镜 L 的曲率半径为 R,形成的 m 级干涉暗条纹的半径为 r_m,m 级干涉亮条纹的半径为 r'_m,不难证明

$$r_m = \sqrt{mR\lambda} \tag{9-1}$$

$$r'_m = \sqrt{(2m-1)R \cdot \frac{\lambda}{2}} \tag{9-2}$$

以上两式表明，当 λ 已知时，只要测出第 m 级暗环（或亮环）的半径，即可算出透镜的曲率半径 R；相反，当 R 已知时，即可算出 λ. 但由于两接触镜面之间难免附着尘埃，并且在接触时难免发生弹性形变，因而接触处不可能是一个几何点，而是一个圆斑，所以近圆心处环纹比较模糊和粗阔，以致难以确切判定环纹的干涉级数 m，即干涉环纹的级数和序数不一定一致. 这样，如果只测量一个环纹的半径，计算结果可能有较大的误差. 为了减少误差，提高测量精度，必须测量距中心较远的、比较清晰的两个环纹的半径，例如测量出第 m_1 个和第 m_2 个暗环（或亮环）的半径（这里 m_1、m_2 均为环序数，不一定是干涉级数），因而(9－1)式应修正为

$$r_m^2 = (m+j)R\lambda \tag{9-3}$$

式中 m 为环序数，$(m+j)$为干涉级数（j 为干涉级修正值），于是

$$r_{m_2}^2 - r_{m_1}^2 = [(m_2+j)-(m_1+j)]R\lambda = (m_2-m_1)R\lambda$$

上式表明，任意两环的半径平方差和干涉级以及环序数无关，而只与两个环的序数之差(m_2-m_1)有关. 因此，只要精确测定两个环的半径，由两个半径的平方差值就可准确地算出透镜的曲率半径 R，即

$$R = \frac{r_{m_2}^2 - r_{m_1}^2}{(m_2-m_1)\lambda} \tag{9-4}$$

由式(9－3)还可以看出，r_m^2 与 m 成直线关系，如图(9－4)所示，其斜率为 $R\lambda$. 因此，也可以测出一组暗环（或亮环）的半径 r_m 和它们相应的环序数 m，作 $r_m^2 - m$ 的关系曲线，然后从直线的斜率 $k = R\lambda = \dfrac{r_{m_2}^2 - r_{m_1}^2}{m_2 - m_1}$，算出 R，显然和(9－4)式的结果是一致的.

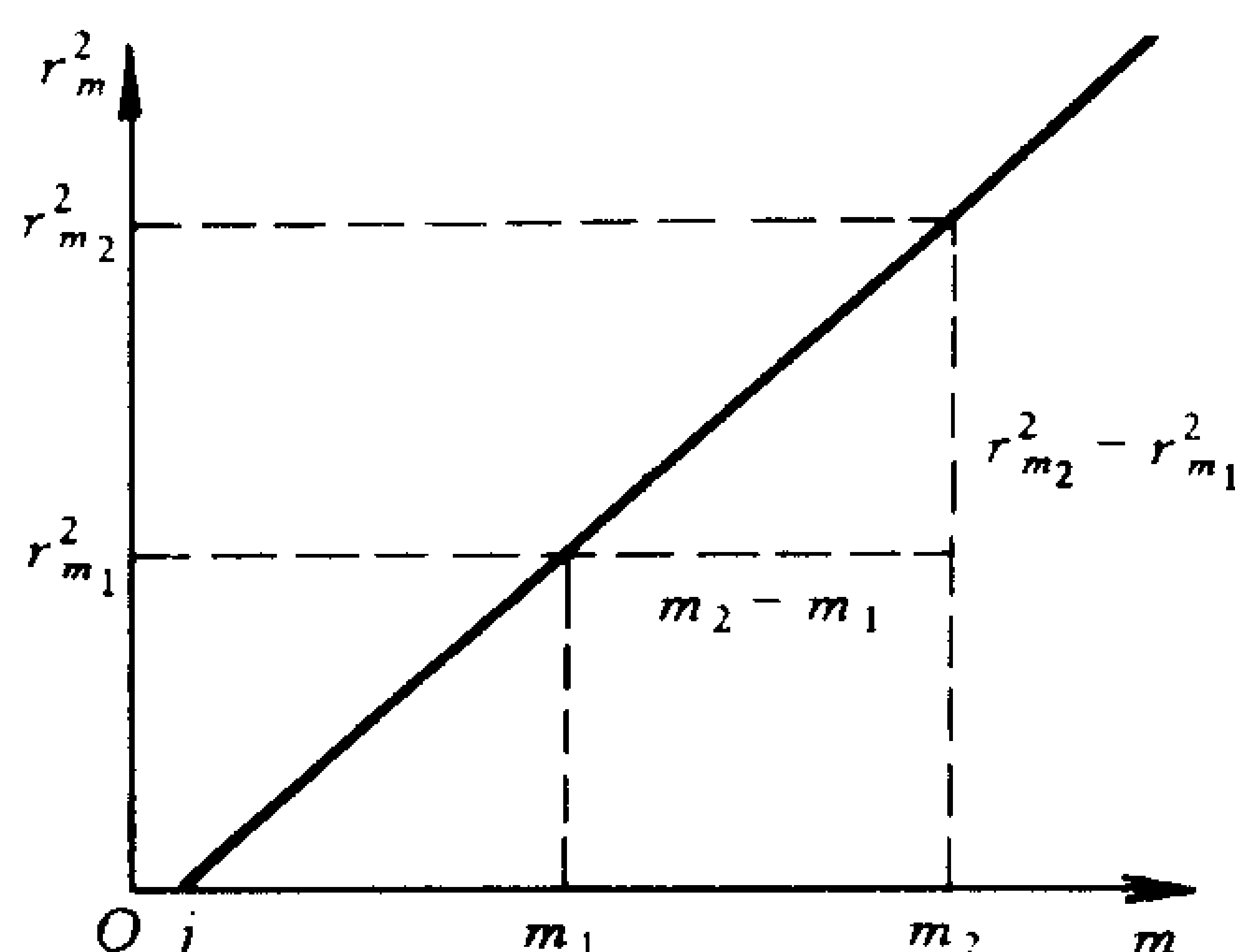


图 9－4

实验内容

1. 借助室内灯光,用眼睛直接观察牛顿环仪,调节框上的螺旋使干涉环呈圆形,并位于透镜的中心,但要注意不能拧紧螺旋.

2. 将仪器按图 9－5 所示装置好,直接使用单色扩展光源钠灯照明. 由光源 S 发出的光照射到玻璃片 G 上,使一部分光由 G 反射进入牛顿环仪. 先用眼睛在竖直方向观察,调节玻璃片 G 的高低及倾斜角度,使显微镜视场中能观察到黄色明亮的视场.(问:实验为何用扩展光源代替平行光源,这对实验结果有否影响?)

3. 调节移测显微镜 M 的目镜,使目镜中看到的叉丝最为清晰. 将移测显微镜对准牛顿环仪的中心,从下向上移动镜筒,对干涉条纹进行调焦,使看到的环纹尽可能清晰,并与显微镜的测量叉丝之间无视差. 测量时,显微镜的叉丝最好调节成其中一根叉丝与显微镜的移动方向相垂直,移动时始终保持这根叉丝与干涉环纹相切,这样便于观察测量.

4. 用移测显微镜测量干涉环的半径

测量时由于中心附近比较模糊,一般取 m 大于 3,至于

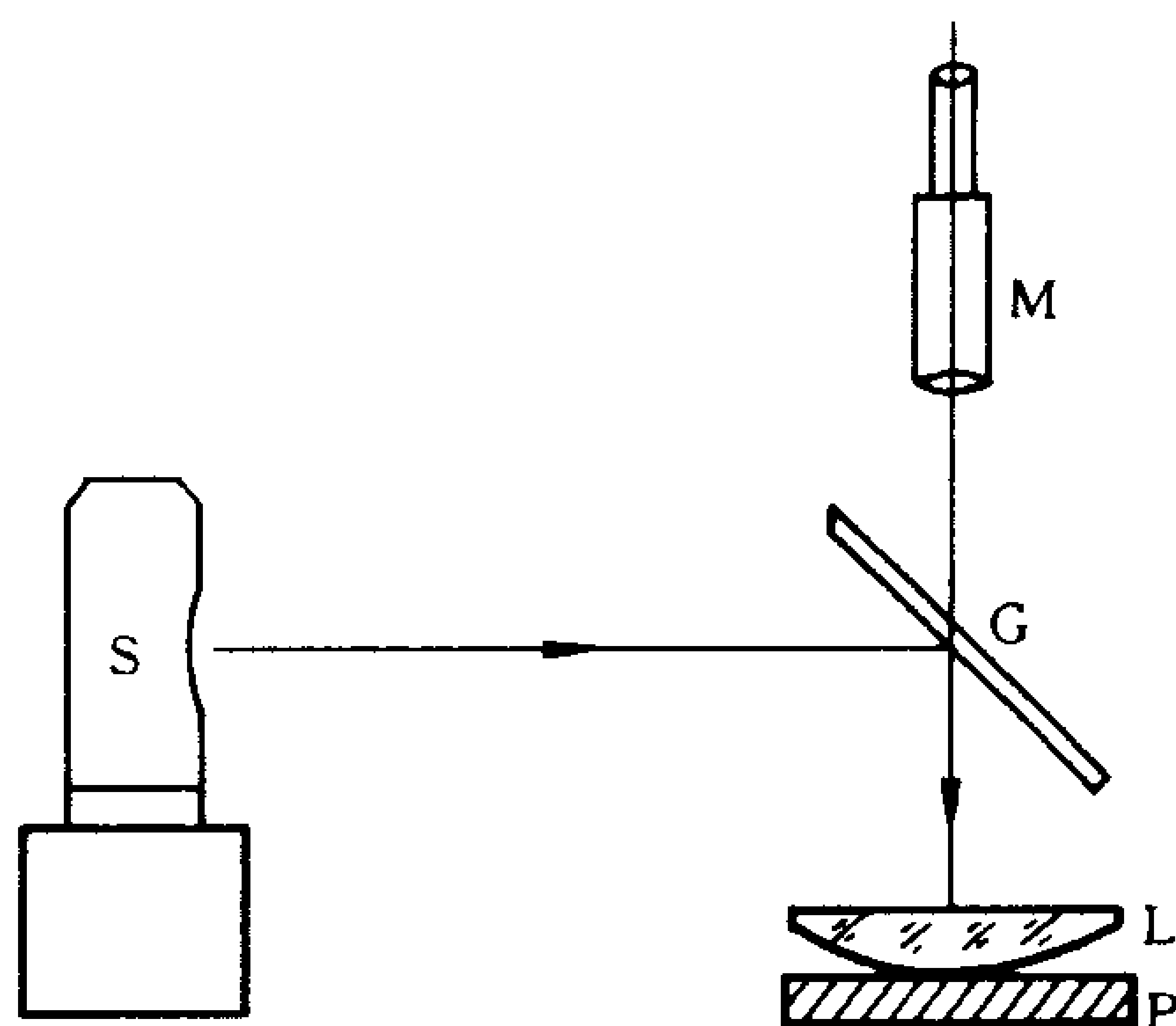


图 9－5

$(m_2 - m_1)$取多大，可根据所观察的牛顿环去定．但是从减小测量误差考虑，$(m_2 - m_1)$不宜太小．下面举一测量方案供参考．

从第 3 暗环到第 22 暗环，测出各环直径两端的位置 x_K、x'_K，要从最外侧的位置 x_{22}开始连续测量，直至 x'_{22}为止(图 9－6)．

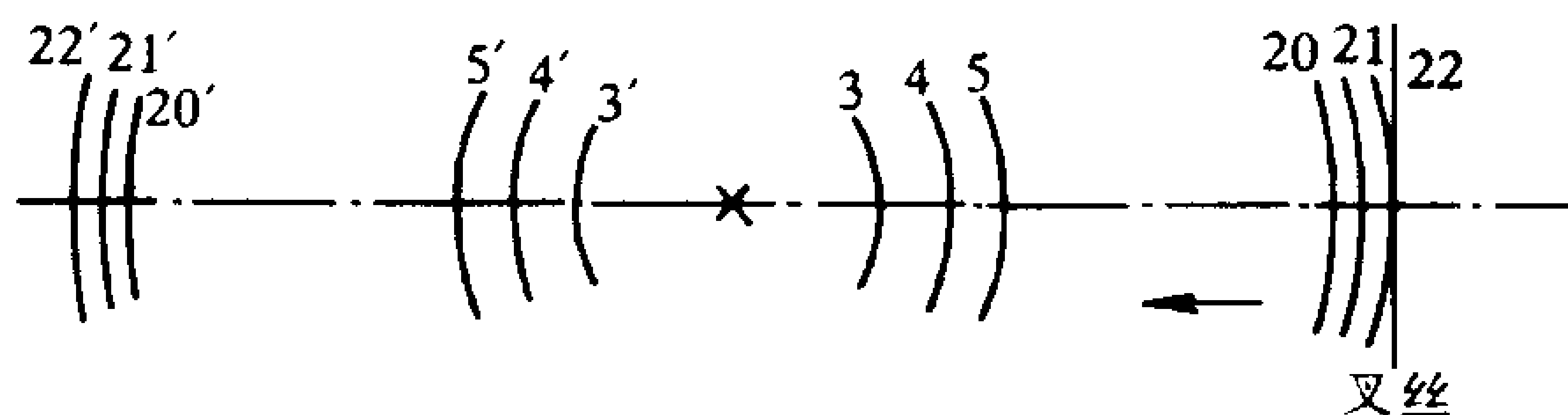


图 9－6

各环的半径 $r_K = \frac{1}{2}|x'_K - x_K|$，取 $m_2 - m_1 = 10$，可得

$$\Delta_1 = r_{13}^2 - r_3^2, \Delta_2 = r_{14}^2 - r_4^2, \cdots, \Delta_{10} = r_{22}^2 - r_{12}^2$$

从式(9－4)可知上列各 Δ 值应相等，取其平均值作为$(r_{m_2}^2 - r_{m_1}^2)$的测量值去计算 R．(问：如果测量的不是干涉环半径，而是干涉环的半弦，对实验有否影响？为什么？[参照式(9－4)]

5．计算平凸透镜的曲率半径 R 及其标准不确定度．

计算 R 时可以依据式(9－3)或式(9－4)进行,钠黄光波长 λ 取 589.3 nm.

注意事项

1. 干涉环两侧的序数不要数错.

2. 防止实验装置受震引起干涉环的变化.

3. 防止移测显微镜的"回程误差",第一个测量值就要注意.

4. 平凸透镜 L 及平板玻璃 P 的表面加工不均匀是此实验的重要的误差来源,为此应测大小不等的多个干涉环的直径去计算 R,可得平均的效果.

复习思考题

1. 如果被测透镜是平凹透镜,能否应用本实验方法测定其凹面的曲率半径? 试说明理由并推导相应的计算公式.

2. 如何改变图 9－5 的实验光路,以观察透射光所产生的干涉条纹?

3. 本实验有哪些系统误差? 怎样减小? 若牛顿环仪平面玻璃系曲率半径为 R_2 的凸球面(假设 R_2 等于待测球面曲率半径 R_1 的 10 倍),试分析说明对计算公式的修正.

4. 设计一个实验方案. 用扩束后的激光照射在平凸透镜上,由透镜两表面的反射形成的非定域干涉环纹,测定凸球面的曲率半径.

实验十　用透射光栅测定光波波长

目的

1. 加深对光栅分光原理的理解；
2. 用透射光栅测定光栅常量、光波波长和光栅角色散；
3. 熟悉分光计的使用方法.

仪器和用具

分光计，平面透射光栅，汞灯，钠灯，单缝（宽度可调）.

原理

光栅和棱镜一样，是重要的分光光学元件，已广泛应用在单色仪、摄谱仪等光学仪器中. 实际上，光栅就是一组数目极多的等宽、等距和平行排列的狭缝. 应用透射光工作的称为透射光栅，应用反射光工作的称为反射光栅. 本实验用的是平面透射光栅.

如图10－1所示，设S为位于透镜L_1物方焦面上的细长狭缝

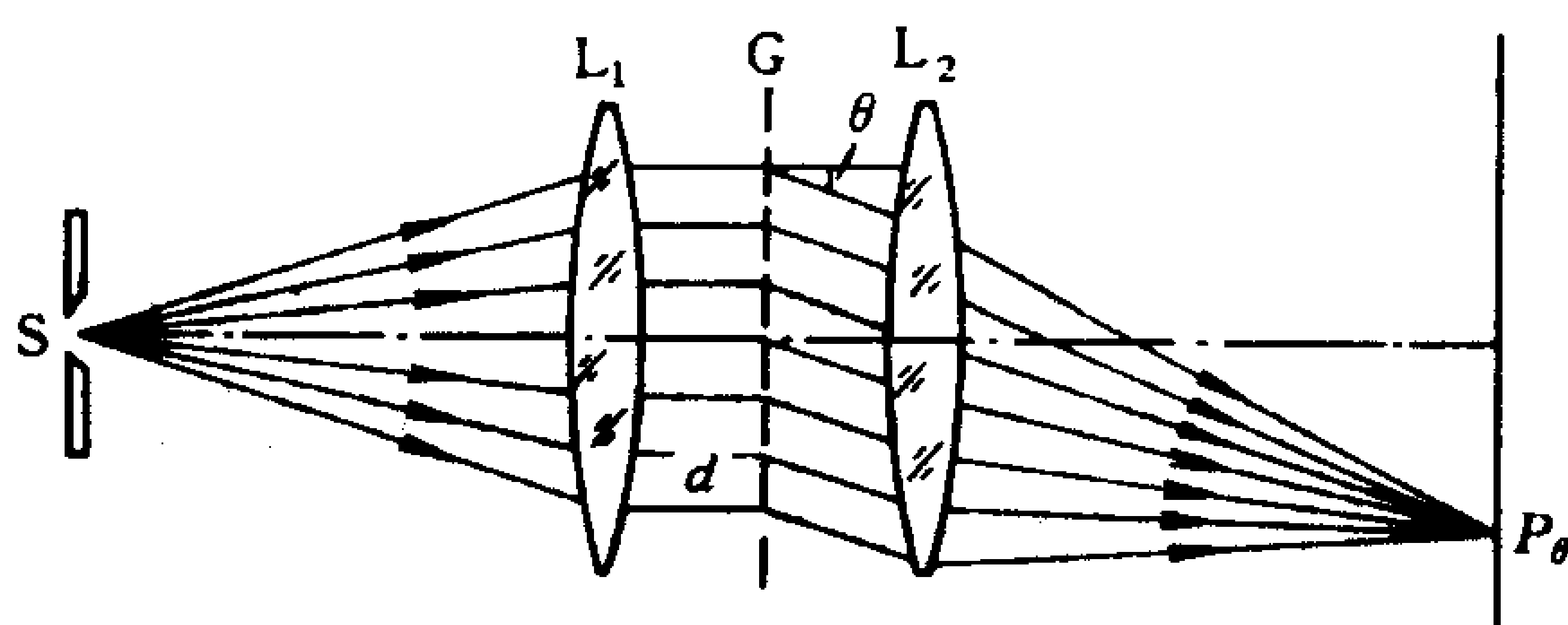


图 10－1

光源，G为光栅，光栅上相邻狭缝的间距 d 称为光栅常量. 自 L_1 射出的平行光垂直地照射在光栅 G 上. 透镜 L_2 将与光栅法线成

θ 角的衍射光会聚于其像方焦面上的 P_θ 点，则产生衍射亮条纹的条件为

$$d\sin\theta = k\lambda \tag{10-1}$$

式(10－1)称为光栅方程．式中 θ 是衍射角，λ 是光波波长，k 是光谱级数($k=0,\pm1,\pm2\cdots$)．衍射亮条纹实际上是光源狭缝的衍射像，是一条锐细的亮线．当 $k=0$ 时，在 $\theta=0$ 的方向上，各种波长的亮线重叠在一起，形成明亮的零级像．对于 k 的其它数值，不同波长的亮线出现在不同的方向上形成光谱，此时各波长的亮线称为光谱线．而与 k 的正、负两组值相对应的两组光谱，则对称地分布在零级像的两侧．因此，若光栅常量 d 为已知，当测定出某谱线的衍射角 θ 和光谱级 k，则可由式(10－1)求出该谱线的波长 λ；反之，如果波长 λ 是已知的，则可求出光栅常量 d．

由光栅方程(10－1)对 λ 微分，可得光栅的角色散

$$D \equiv \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\lambda} = \frac{k}{d\cos\theta} \tag{10-2}$$

角色散是光栅、棱镜等分光元件的重要参数，它表示单位波长间隔内两单色谱线之间的角间距．由式(10－2)可知，光栅常量 d 愈小，角色散愈大；此外，光谱的级次愈高，角色散也愈大．而且光栅衍射时，如果衍射角不大，则 $\cos\theta$ 近于不变，光谱的角色散几乎与波长无关，即光谱随波长的分布比较均匀，这和棱镜的不均匀色散有明显的不同．

分辨本领是光栅的又一重要参数，它表征光栅分辨光谱细节的能力．设波长为 λ 和 $\lambda+\mathrm{d}\lambda$ 的不同光波，经光栅衍射形成两条谱线刚刚能被分开，则光栅分辨本领 R 为

$$R = \frac{\lambda}{\mathrm{d}\lambda} \tag{10-3}$$

根据瑞利判据，当一条谱线强度的极大值和另一条谱线强度的第一极小值重合时，则可认为该两谱线刚能被分辨．由此可以推出

$$R = kN \tag{10-4}$$

其中 k 为光谱级数,N 是光栅刻线的总数.(问:设某光栅 $N=4\,000$,对一级光谱在波长为 590 nm 附近,它刚能辨认的两谱线的波长差为多少?)

实验内容

1. 分光计的调节

按§3-4有关内容,调节分光计,即

(1) 望远镜适应平行光(对无穷远调焦).

(2) 望远镜、准直管主轴均垂直于仪器主轴.

(3) 准直管发出平行光.

2. 光栅位置的调节

(1) 根据前述原理的要求,光栅面应调节到垂直于入射光.

(2) 根据衍射角测量的要求,光栅衍射面应调节到和观测面度盘平面一致.

当分光计的调节已完成时,方可进行这部分调节.

首先,使望远镜对准准直管,从望远镜中观察被照亮的准直管狭缝的像,使其和叉丝的竖直线重合,固定望远镜.其次,参照图10-2放置光栅,点亮目镜叉丝照明灯(移开或关闭狭缝照明灯),左右转动载物平台,看到反射的"绿十字",调节 b_2 或 b_3 使绿十字和目镜中的调整叉丝重合.这时光栅面已垂直于入射光.

用汞灯照亮准直管的狭缝.转动望远镜观察光谱,如果左右两侧的光谱线相对于目镜中叉丝的水平线高低不等时(如图10-3),说明光栅的衍射面和观察面不一致,这时可调节平台上的螺钉 b_1 使它们一致.(问:这时调平台上的螺钉 b_2 或 b_3 可否?为何?)

3. 测光栅常量 d

根据式(10-1),只要测出第 k 级光谱中波长 λ 已知的谱线的衍射角 θ,就可求出 d 值.

已知波长可以用汞灯光谱中的绿线($\lambda=546.07$ nm),也可用

钠灯光谱中二黄线($\lambda_{D_1}=589.592$ nm, $\lambda_{D_2}=588.995$ nm)之一.

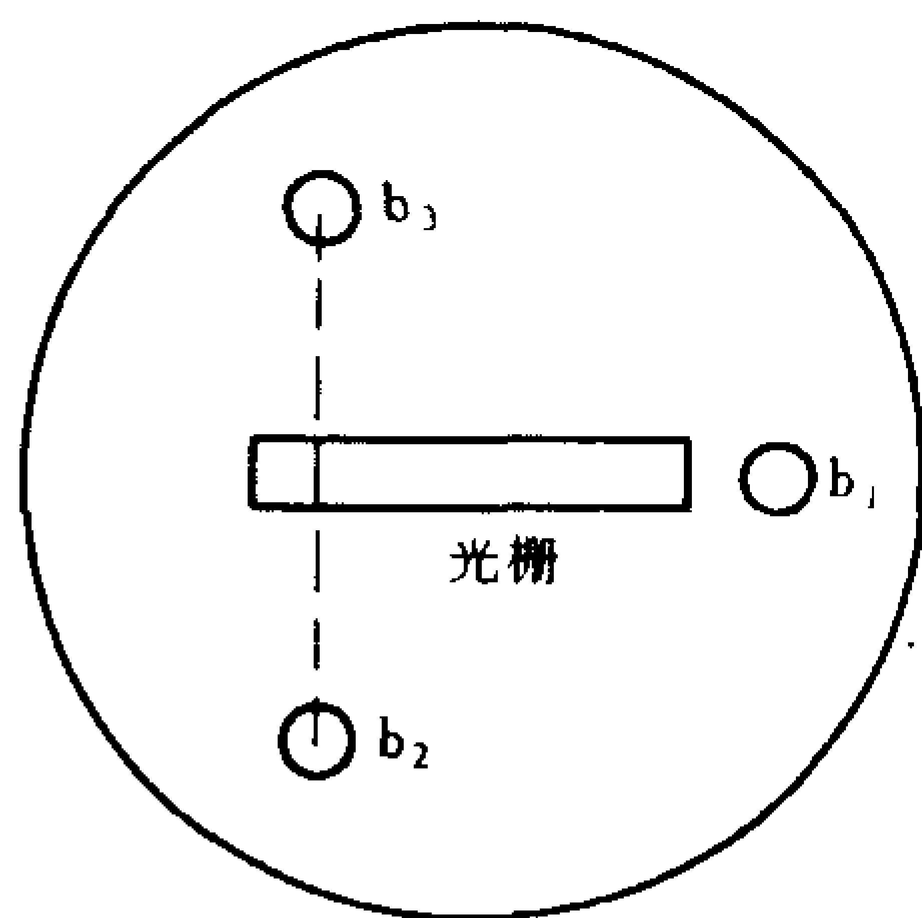


图 10-2

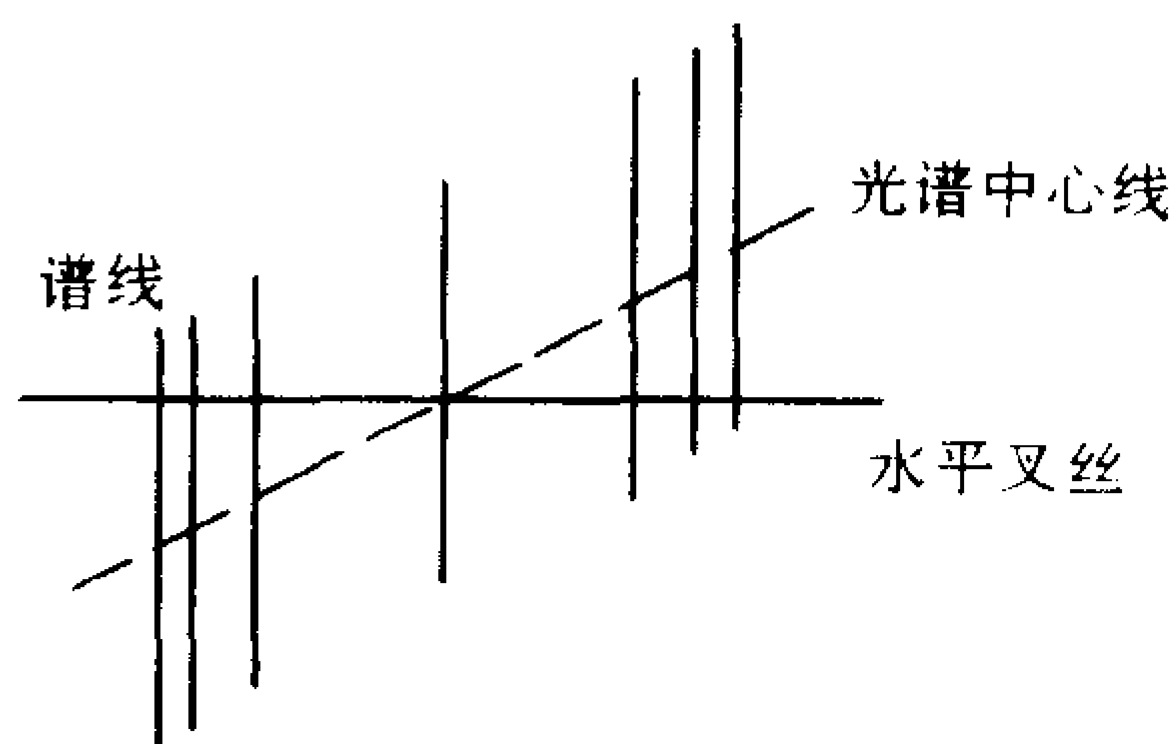


图 10-3

光谱级数 k 由自己确定.

转动望远镜到光栅的一侧,使叉丝的竖直线对准已知波长的第 k 级谱线的中心,记录二游标值.(问:还记得为何用两个游标吗?控制望远镜转动的有两个螺旋,还记得如何配合使用吗?)

将望远镜转向光栅的另一侧,同上测量,同一游标的两次读数之差是衍射角 θ 的二倍.

重复测量几次,计算 d 值及其标准不确定度.

4. 测量未知波长

由于光栅常量 d 已测出,因此只要测出未知波长的第 k 级谱线的衍射角 θ,就可求出其波长值 λ.

可以选取汞灯光谱中的几条强谱线作为波长未知的测量目标.衍射角的测量同上.

5. 测量光栅的角色散

用钠灯或汞灯为光源,测量其 1 级和 2 级光谱中二黄线的衍射角,二黄线的波长差 $\Delta\lambda$,对钠光谱为 0.597 nm,对汞光谱为 2.06 nm,结合测得的衍射角之差 $\Delta\theta(=\theta_2-\theta_1)$,求角色散 $D=\Delta\theta/\Delta\lambda$.

6．考查光栅的分辨本领

用钠灯为光源，观察它的一级光谱的二黄线，在此是考查所用光栅，当二黄线刚能被分辨出时，光栅的刻线数应限制在多少．

转动望远镜看到钠光谱的二黄线，在准直管和光栅之间放置一宽度可调的单缝，使单缝的方向和准直管狭缝一致，由大到小改变单缝的宽度，直至二黄线刚刚被分辨开．反复试几次，取下单缝，用移测显微镜测出缝宽 b．则在单缝掩盖下，光栅的露出部分的刻线数 N 等于

$$N = b/d$$

由此求出光栅露出部分的分辨本领 $R(=kN)$，并和由式(10－3)求出的理论值相比较．

注意事项

1．按光栅位置调节的两项要求逐一调节后，应再重复检查，因为调节后一项时，可能对前一项的状况有些破坏．

2．光栅位置调好之后，在实验中不应移动．

3．本实验如使用复制刻划光栅，可选用光栅常量较大的光栅，以便于观察高级次光谱中不同级次光谱的重叠现象；如使用全息光栅，因衍射光能大部分集中于一级光谱，高级次光谱难于观察，从测量效果考虑，应选用光栅常量较小的光栅．

复习思考题

1．比较棱镜和光栅分光的主要区别．

2．分析光栅面和入射平行光不严格垂直时对实验有何影响？

3．如果光波波长都是未知的，能否用光栅测其波长？

4．设计一种不用分光计，只用米尺和光栅去测 d 和 λ 的方案．

实验十一　偏振现象的观测与分析

目的

1. 观察光的偏振现象,加深对偏振光的了解;
2. 掌握产生和检验偏振光的原理和方法;
3. 了解旋光计的构造原理,并应用旋光计测定糖溶液的浓度.

练习一　偏振光的分析

仪器和用具

氦氖激光器,偏振片(或尼科耳棱镜),半波片,1/4 波片,硅光电池,灵敏电流计,减光板,玻璃片和架.

原理

能使自然光变成偏振光的装置或器件,称为起偏器. 用来检验偏振光的装置或器件,称为检偏器. 实际上,能产生偏振光的器件,同样可用作检偏器.

1. 平面偏振光的产生

(1) 由反射和折射产生偏振

自然光在透明介质(如玻璃)上反射或折射时,其反射光和折射光为部分偏振光. 当入射角为布儒斯特角时反射光接近于完全偏振光. 其偏振面垂直于入射面.

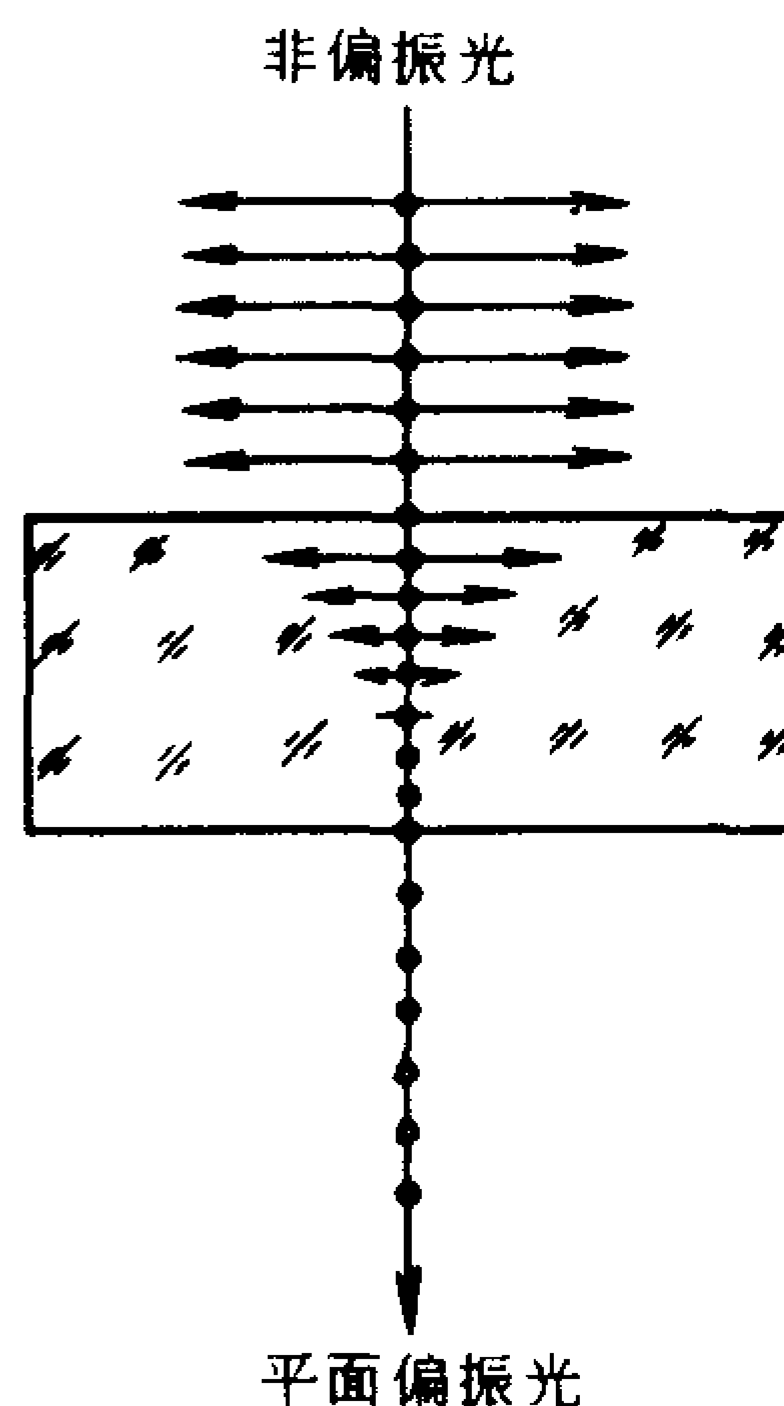


图 11－1

(2) 由二向色性晶体的选择吸收产生偏振

有些晶体(如电气石、人造偏振片)对两个相互垂直振动的电矢量具有不同的吸收本领,这种选择吸收性,称为二向色性. 当自然光通过二向色性晶体时,其中一成分的振动几乎被完全吸收,而另一成分的振动几乎没有损失(图11－1),因此,透射光就成为平面偏振光. 利用偏振片可以获得截面较宽的偏振光束,而且造价低廉,使用方便. 偏振片的缺点是有颜色,光透过率稍低.

(3) 由晶体双折射产生偏振

当自然光入射于某些各向异性晶体时,在晶体内折射后分解为两束平面偏振光,并以不同的速度在晶体内传播,可用某一方法使两束光分开,除去其中一束,剩余的一束就是平面偏振光. 尼科耳(Nicol)棱镜是这类元件之一(图 11－2). 它由两块经特殊切割的方解石晶体,用加拿大树胶粘合而成. 偏振面平行于晶体的主截面的偏振光可以透过尼科耳棱镜,垂直于主截面的偏振光在胶层上发生全反射而被除掉.

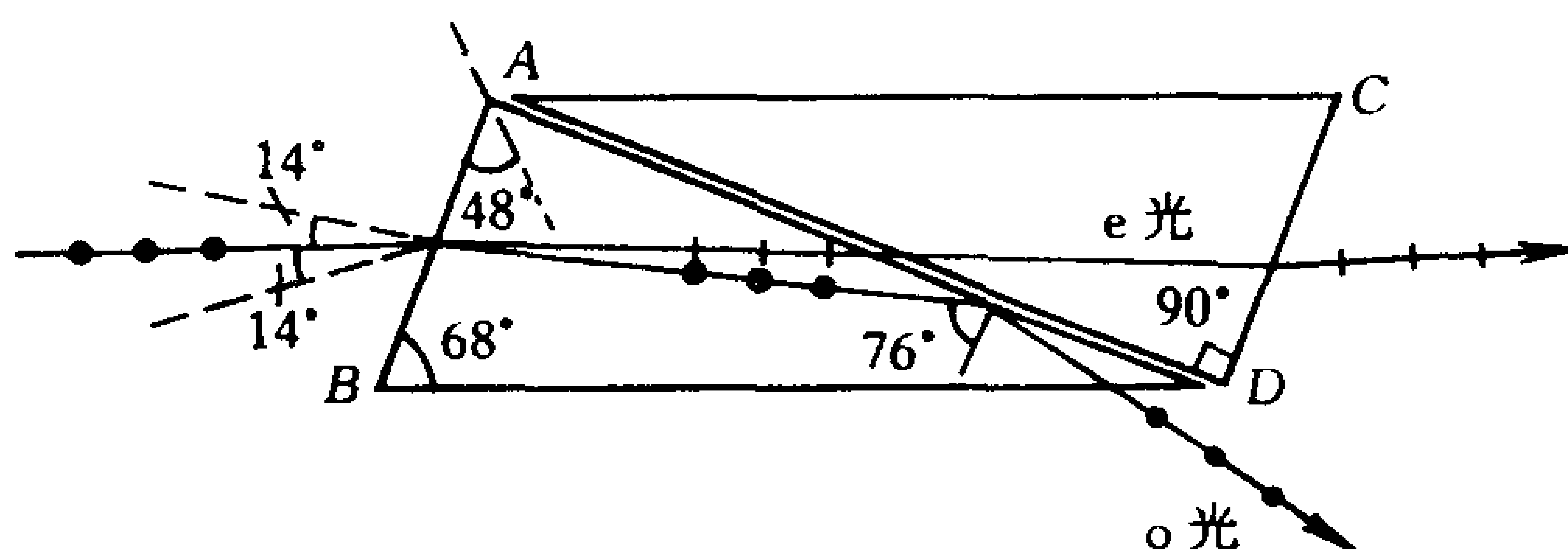


图 11－2　尼科耳棱镜

2. 圆偏振光和椭圆偏振光的产生

如图 11－3 所示,当振幅为 A 的平面偏振光垂直入射到表面平行于光轴的双折射晶片时,若振动方向与晶片光轴的夹角为 α,则在晶片表面上 o 光和 e 光的振幅分别为 $A\sin\alpha$ 和 $A\cos\alpha$,它们的相位相同. 进入晶片后,o 光和 e 光虽然沿同一方向传播,但具有不同的速度. 因此,经过厚度为 d 的晶片后,o 光和 e 光之间将产生相差 δ:

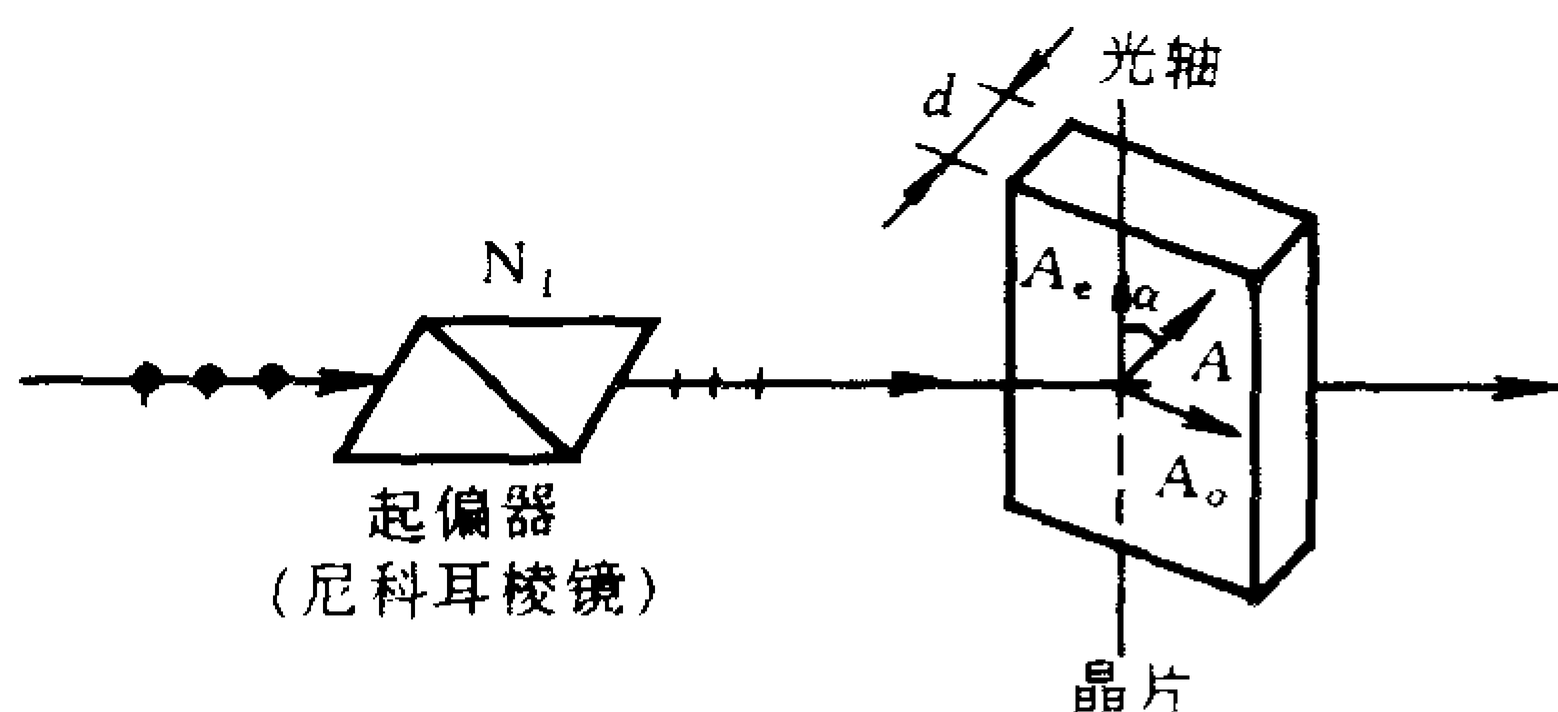


图 11－3

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)d \qquad (11-1)$$

式中 λ_0 表示光在真空中的波长，n_o 和 n_e 分别为晶体中 o 光和 e 光的折射率.

(1) 如果晶片的厚度使产生的相差 $\delta = \frac{1}{2}(2k+1)\pi, k=0,1,2,\cdots$，这样的晶片称为 1/4 波片. 平面偏振光通过 1/4 波片后，透射光一般是椭圆偏振光，当 $\alpha = \pi/4$ 时，则为圆偏振光；但当 $\alpha = 0$ 和 $\pi/2$ 时，椭圆偏振光退化为平面偏振光.

换言之，1/4 波片可将平面偏振光变成椭圆偏振光或圆偏振光；反之，它也可将椭圆偏振光或圆偏振光变成平面偏振光.

(2) 如果晶片的厚度使产生的相差 $\delta = (2k+1)\pi, k=0,1,2,\cdots$，这样的晶片称为半波片. 如果入射平面偏振光的振动面与半波片光轴的交角为 α，则通过半波片后的光仍为平面偏振光，但其振动面相对于入射光的振动面转过 2α 角.

3. 平面偏振光通过检偏器后光强的变化

强度为 I_0 的平面偏振光通过检偏器后的光强 I_θ 为

$$I_\theta = I_0\cos^2\theta \qquad (11-2)$$

其中 θ 为平面偏振光偏振面和检验器主截面的夹角，此关系即马吕斯(Malus)定律，它表示改变 θ 角可以改变透过检偏器的光强.

当起偏器和检偏器的取向使得通过的光量极大时，称它们为

平行(此时 $\theta=0$). 当二者的取向使系统射出的光量极小时,称它们为正交(此时 $\theta=90°$).

4. 单色平面偏振光的干涉

如图 11-4(a)所示,一束自然光经起偏器(尼科耳棱镜或偏振片)N_1 后,变成振幅为 A 的平面偏振光,再通过晶片 K,射到检

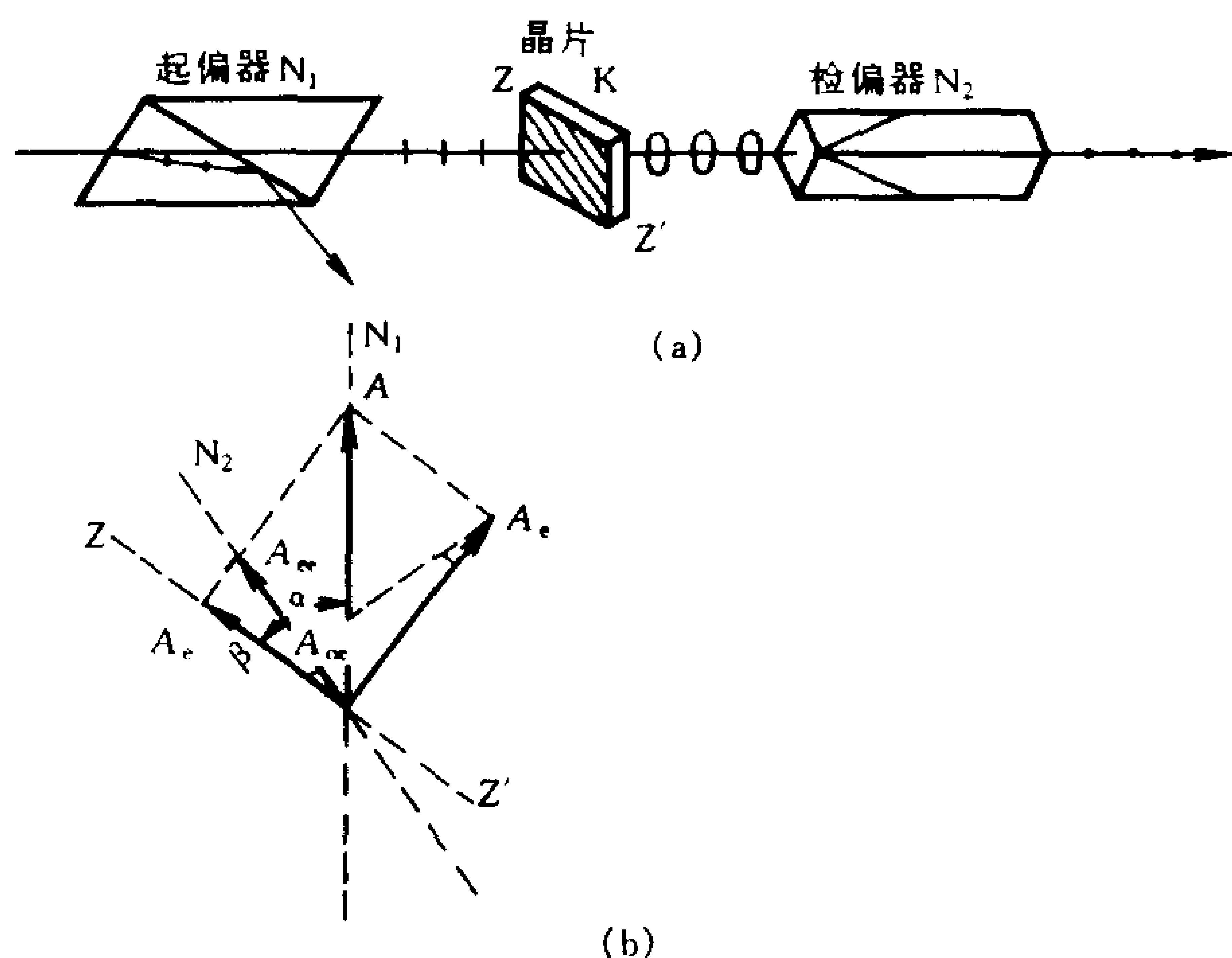


图 11-4

偏器(尼科耳棱镜或偏振片)N_2 上. 图 11-4(b)表示透过 N_2 迎着光线观察到的振动情况,其中 N_1、N_2 及 ZZ'分别表示起偏器的主截面、检偏器的主截面和晶片的光轴在同一平面上的投影,α 和 β 分别为 N_1、N_2 的主截面与晶片的光轴 ZZ'的夹角. 从晶片透过的两平面偏振光的振幅分别为:

$$A_o = A\sin\alpha; \qquad A_e = A\cos\alpha \qquad (11-3)$$

它们的相差为 δ. 穿过 N_2 后,只存在振动平行于 N_2 主截面的分量 A_{oe}和 A_{ee},其大小为

$$A_{oe} = A_o\sin\beta = A\sin\alpha\cdot\sin\beta$$

$$A_{ee} = A_e\cos\beta = A\cos\alpha\cdot\cos\beta \qquad (11-4)$$

可见这两束光是同频率、不等振幅、振动在同一平面内的相干光.因此,透射光的光强(按双光束干涉的光强计算方法)为

$$I_2 = A_{oe}^2 + A_{o e}^2 + 2A_{oe}A_{oe}\cos\delta$$
$$= I_1\left[\cos^2(\alpha-\beta) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2\frac{\delta}{2}\right] \quad (11-5)$$

式中 $I_1 = A^2$,它是从起偏器 N_1 透射的平面偏振光的光强,从式(11-5)可以看出:

(1) 当 α(或 β)=0、$\pi/2$ 或 π 时,

$$I_2 = I_1\cos^2(\alpha-\beta) \quad (11-6)$$

即透射光强只与 N_1、N_2 两主截面的交角的余弦平方成正比,和不用晶片时一样.

(2) 当 N_1 与 N_2 正交时,$(\alpha-\beta)=\pi/2$,则

$$I_2 = I_1\sin^2 2\alpha \cdot \sin^2\frac{\delta}{2} \quad (11-7)$$

如果晶片是半波片,则 $\delta=\pi$,当 α 等于 $\pi/4$ 的奇数倍时,$I_2 = I_1$,即有光透过 N_2,发生相长干涉;当 α 等于 $\pi/4$ 的偶数倍时 $I_2=0$,无光透过,发生相消干涉.由此可见,当半波片旋转一周时,视场内将出现四次消光现象.

(3) 当 N_1 与 N_2 平行时,$(\alpha-\beta)=0$,于是有

$$I_2 = I_1\left(1-\sin^2 2\alpha \cdot \sin^2\frac{\delta}{2}\right). \quad (11-8)$$

可以看出,这时透过 N_2 的光强恰与 N_1、N_2 正交时互补.

实验内容

1. 偏振片主截面的确定

如图 11-5 将一背面涂黑的玻璃片 G 立在铅直面内,激光器 L 射出的一细光束沿水平方向入射到玻璃片上,G 的反射光为偏振面垂直于入射面的平面偏振光,使 G 的反射光垂直射入偏振片 N,以反射光的方向为轴旋转偏振片 N,从透过光强度的变化和反

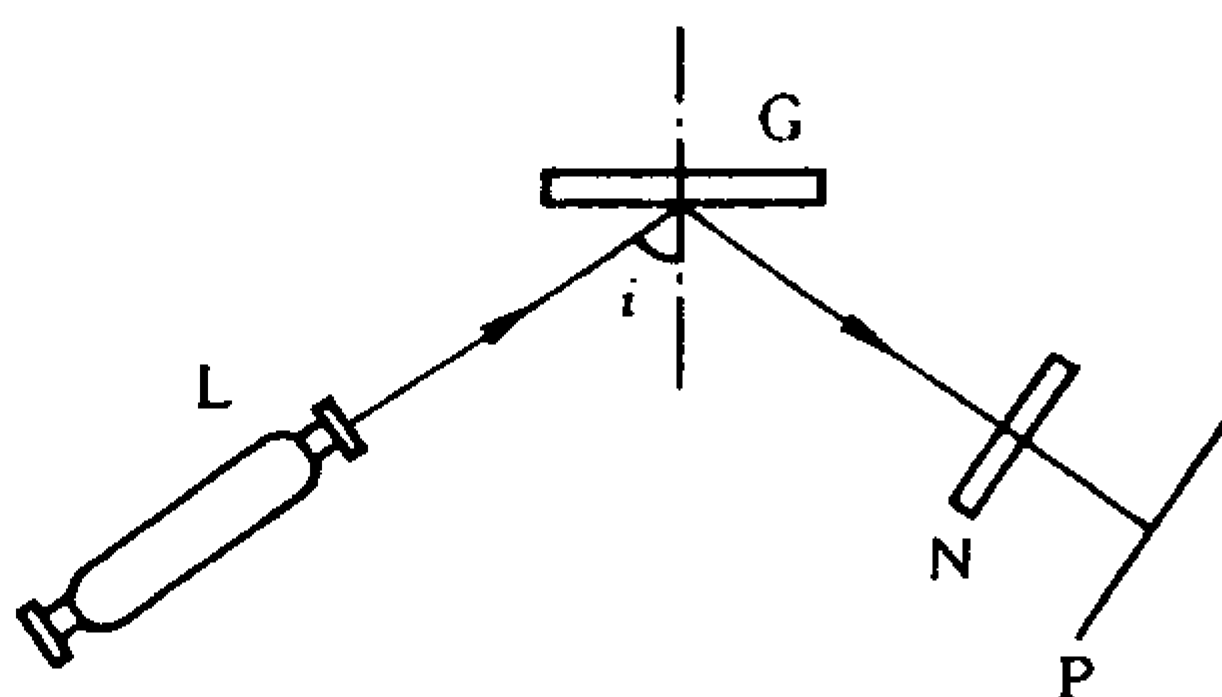


图 11－5

射光的偏振面，可以确定偏振片的主截面，即透过光强极大时偏振片的主截面和反射光的偏振面一致.

在偏振片上标记其主截面的方向.

2. 验证马吕斯定律

如图 11－6 安置仪器，使激光器 L 射出的光束，穿过起偏器 N_1 和检偏器 N_2 射到硅光电池 P_c 上，使 N_1N_2 正交，记录灵敏电流计上的示值. 以下将检偏器每转一角度(10～15°)记录一次，直至转动 90°为止，应重复几次.

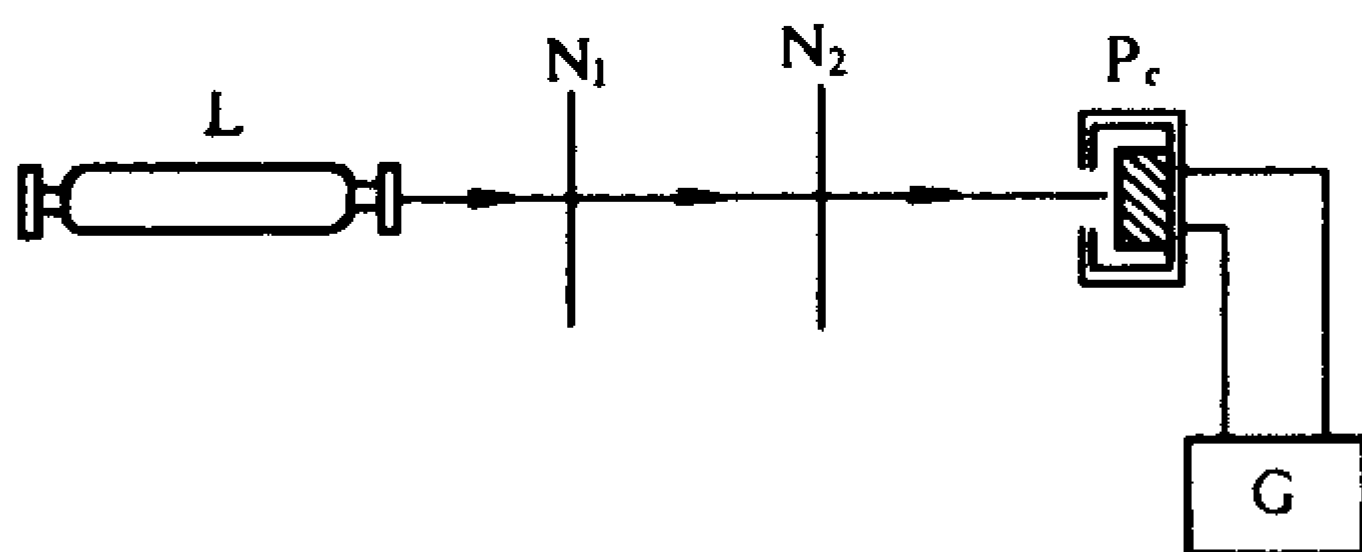


图 11－6

自己设计利用这些数据验证马吕斯定律的方案.

3. 考查半波片对偏振光的影响

(1) 使用图 11－6 的装置，调 N_1、N_2 为正交，在 N_1N_2 间和 N_1 平行放置半波片，以光线方向为轴将波片转 360°，记录出现消光的次数和相对于 N_2 的位置(角度).

(2) 使 N_1 和 N_2 正交，半波片的光轴和 N_1 的主截面成 α

(10～15°)角，转 N_2 使之再消光，记录 N_2 的位置．改变 α 角，每次增加 10～15°，同上测量直至 α 等于 90°．

说明以上观察的记录．

4．椭圆偏振光、圆偏振光的产生与检验

实验装置同上，将半波片换成为 1/4 波片．

(1) 使 N_1、N_2 正交，以光线方向为轴将波片转 360°，记录观测到的现象．

(2) 使用起偏器 N_1 和 1/4 波片产生椭圆偏振光，旋转检偏器 N_2 观测光强的变化．记录波片光轴相对 N_1 主截面的夹角 α，以及转动 N_2 光强极大、极小时 N_2 主截面与波片光轴的夹角 β．α 取不同值重复观测．(问：此观察结果和实验内容 1 的结果有根本区别吗？)

(3) 使用 N_1 和 1/4 波片产生圆偏振光(问：应当怎样安置 1/4 波片？)，旋转 N_2 进行观测并记录．

(4) 为了区分椭圆偏振光和部分偏振光、圆偏振光和自然光，要在检偏器前再加一 1/4 波片去观测．

参照上记 4(2)，4(3)获得椭圆偏振光和圆偏振光，如何获得部分偏振光由自己去设计，使用 1/4 波片和检偏器作对比检验，即椭圆偏振光与部分偏振光对比；圆偏振光与自然光对比．要考虑第二个 1/4 波片如何放置．

5．设计一实验方案(原理和步骤)，如何应用一个 1/4 波片和一个检偏器，去判断椭圆偏振光的旋转方向．

注意事项

1．激光器发光强度的起伏对实验有影响，为此要由稳压电源供电，并预热半小时．

2．应用光电池记录光强时，灵敏电流计应选用低内阻型．读数时，要注意扣除环境杂散光产生本底电流的影响．

当光电流的测量值范围过大时，为避免改变电流计的量程，影

响电流计的内阻和测量的灵敏度，同时电流计上量程的变化也不一定符合要求，测量时最好不要使用电流计上的换挡机构去改变量程. 通常采用图 11－7 的电路，即可保持电流计低内阻 R_g 不变，同时又能扩大电流计的量程. 灵敏电流计 G 串联一电阻 R_1 后和分流电阻 R_2 并联，再接入光电池 P_c 的测量电路. 当 R_1、R_2 的阻值满足下列关系式

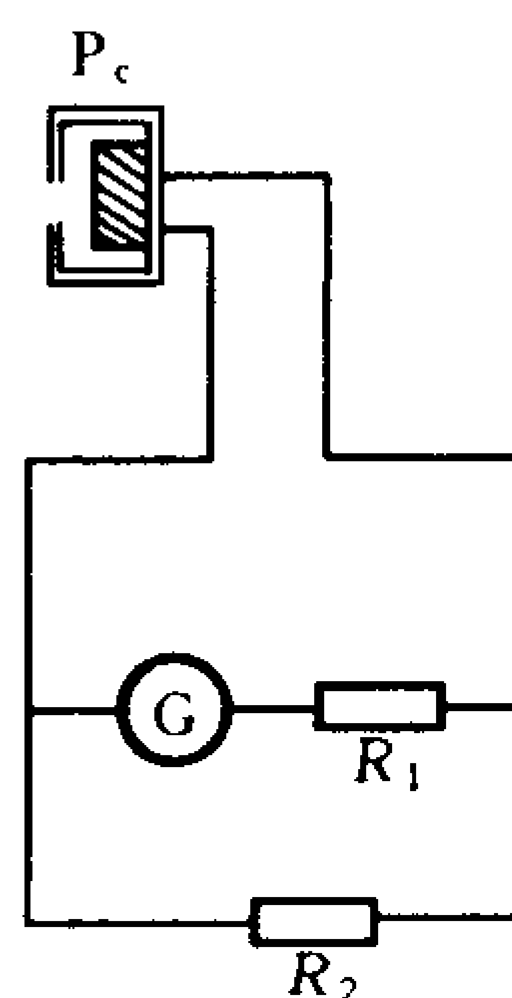


图 11－7

$$\begin{cases} R_1 = (n-1)R_g \\ R_2 = \dfrac{n}{(n-1)}R_g \end{cases} \qquad (11-9)$$

时，整个线路的总电阻仍为 R_g，但量程却扩大了 n 倍.

3. 由于波片产生附加的相差 δ 均与入射光波的波长有关，实验中选用的波片应与照明光的波长相对应，才能观察到理论预期的实验效果.

4. 在观察和讨论波片对偏振光的影响时，准确地确定起偏器 N_1 的主截面与波片光轴的夹角 α 是很重要的，而实际使用的波片，光轴方向定位不够准确，为此应善于运用理论来指导实践，即根据波片在正交偏振片之间，绕光线方向旋转一周时，在四个特定方位将出现消光的特性，以帮助校准波片光轴和 N_1 之间夹角的零位.

5. 本实验最好使用钠灯作光源，并通过准直透镜将其调节为平行光束后进行实验.

练习二　用旋光计测定糖溶液的浓度

仪器和用具

旋光计，玻璃管，蔗糖溶液，钠灯.

原理

平面偏振光在某些晶体内沿其光轴方向传播时，虽然没有发生双折射，却发现透射光的振动面相对于原入射光的振动面旋转了一个角度. 晶体的这种性质称为旋光性. 后来从实验发现，某些液体也具有旋光性. 如果迎着光的传播方向看，旋光性物质使振动面沿顺时针方向旋转，称为右旋物质；使振动面沿逆时针方向旋转，称为左旋物质. 实验表明，振动面旋转的角度 φ 与其所通过旋光性物质的厚度成正比. 若为溶液，则又正比于溶液的质量浓度 c，此外，旋转角还与入射光波长及溶液温度等有关. 对溶液来说，振动面的旋转角

$$\varphi = \rho l c \tag{11-10}$$

式中 l 是以分米(dm)为单位的液柱长；c 为溶液的质量浓度，代表每立方厘米溶液中所含溶质的质量(质量以克为单位)；ρ 为比例系数，称为物质的旋光率，旋光率的定义是平面偏振光通过 1 dm长的液柱，在 1 cm^3 溶液中含有 1 g 旋光物质时所产生的旋转角. 纯洁蔗糖在 20℃ 时，对于钠黄光，经多次测定确认 $\rho = 66.50° cm^3/dm \cdot g$. 因此，若测出糖溶液的旋转角 φ 和液柱长 l，即可按式(11－10)算出蔗糖溶液的质量浓度 c. 专门用于测量糖溶液浓度的旋光计，称为糖量计.

旋光计的结构如图 11－8 所示. S 为光源(钠灯)；F 为聚光镜(固定)；N_1 为起偏器(尼科耳棱镜)；N_2 为检偏器(尼科耳棱镜)，

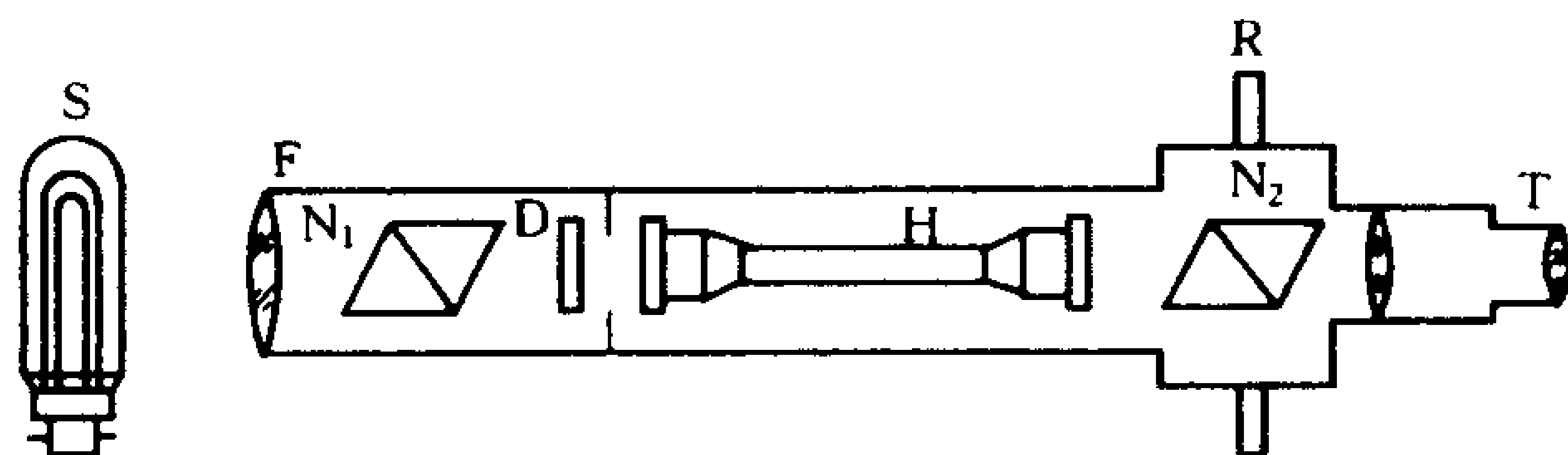


图 11－8

N_2 可以旋转，旋转的角度从 N_2 所附的刻度盘 R 上读出；D 为半荫片（一半是玻璃，一半是石英半波片；或两旁为玻璃，中间为石英半波片如图 11－9 所示），H 为盛放溶液的管子；T 为短焦距望远镜.

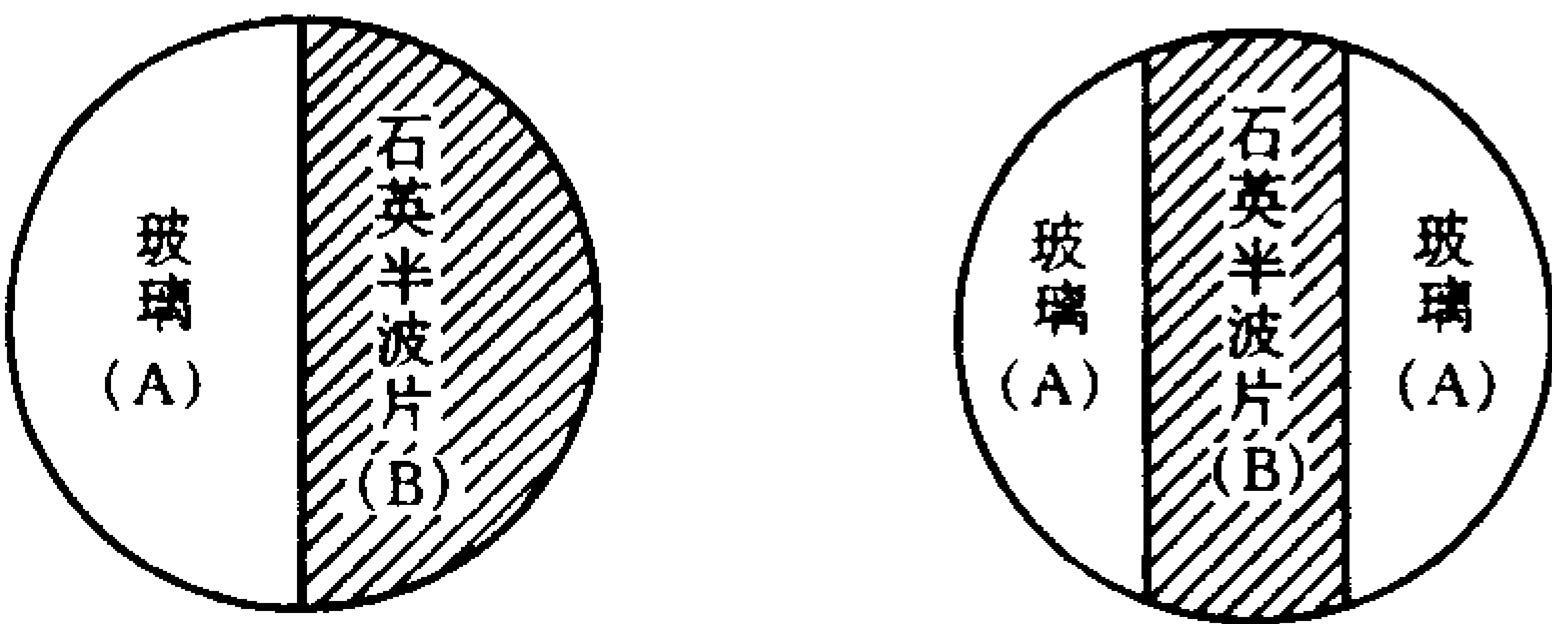


图 11－9

由光源发出的单色光经 N_1 后成为平面偏振光，其偏振面与 N_1 的主截面平行（参看图 11－10），平面偏振光通过半荫片 D 的

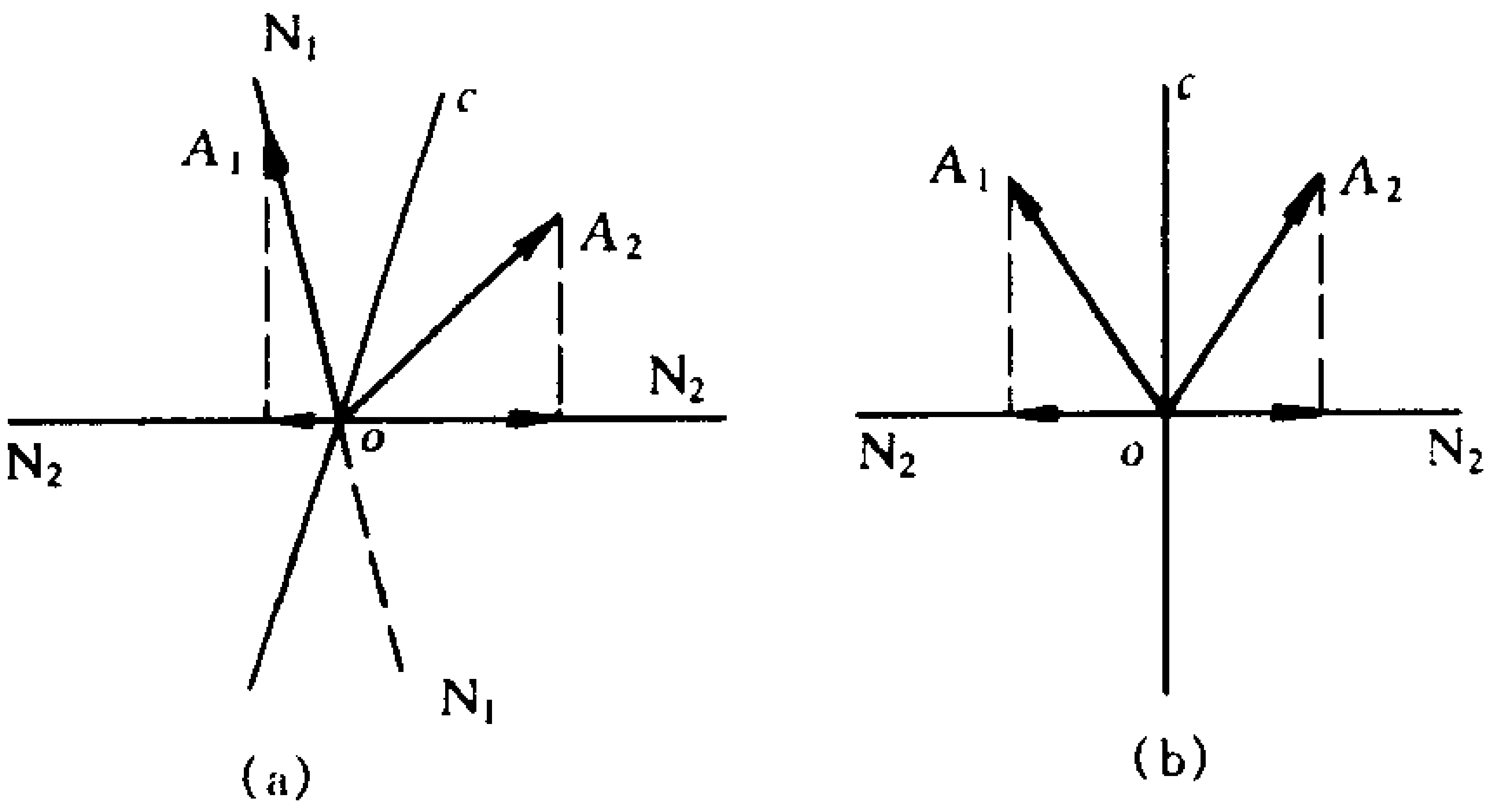


图 11－10

玻璃部分后，透射光的偏振面不变，设其振动方向为 oA_1，而通过石英半波片那一部分光的振动面却转过了一角度，设其振动方向为 oA_2. 若 H 中未存放溶液，则由半荫片透出的两束光射至 N_2 之前，振动方向不发生任何改变. 当 $N_2 /\!/ N_1$ 时，望远镜视场中看到的是 A 区域亮，B 区域暗；当 $N_2 \perp N_1$ 时，A 区域无光，B 区域亮.

如果旋转 N_2，当其主截面垂直或平行于角 A_1oA_2 的平分线 oc 时，oA_1 和 oA_2 在 N_2 方向上的分量将相等，视场两区域照度将相同. 显然，$N_2 // oc$ 时，照度较强；而 $N_2 \perp oc$ 时，照度较弱. 通常，取 $N_2 \perp oc$ 的位置作为标准来进行调节，这是因为人眼在一定范围内，对于弱照度的变化较敏感，而且在此位置时，只要 N_2 相对于 oc 略有偏转，两区域之一将明显变亮，另一将明显变暗，因此，易于判别，测量更为准确.

当 H 中盛有糖溶液时，振动面 oA_1 和 oA_2 都转过一定角度，而变为 oA'_1 和 oA'_2（图 11－11），视场中又呈现出不同的照度. 欲再使视场中照度一样，必须将 N_2 旋转至 N'_2 位置，使 N'_2 与 $A'_1oA'_2$ 夹角的平分线 oc' 垂直. 这样，N_2 转过的角度，即为平面偏振光振动面的旋转角，这一角度可从附于 N_2 上的刻度盘 R 读出，从而可算出被测糖溶液的质量浓度. 专用糖量计往往直接标出糖溶液质量浓度，这就省得换算了.

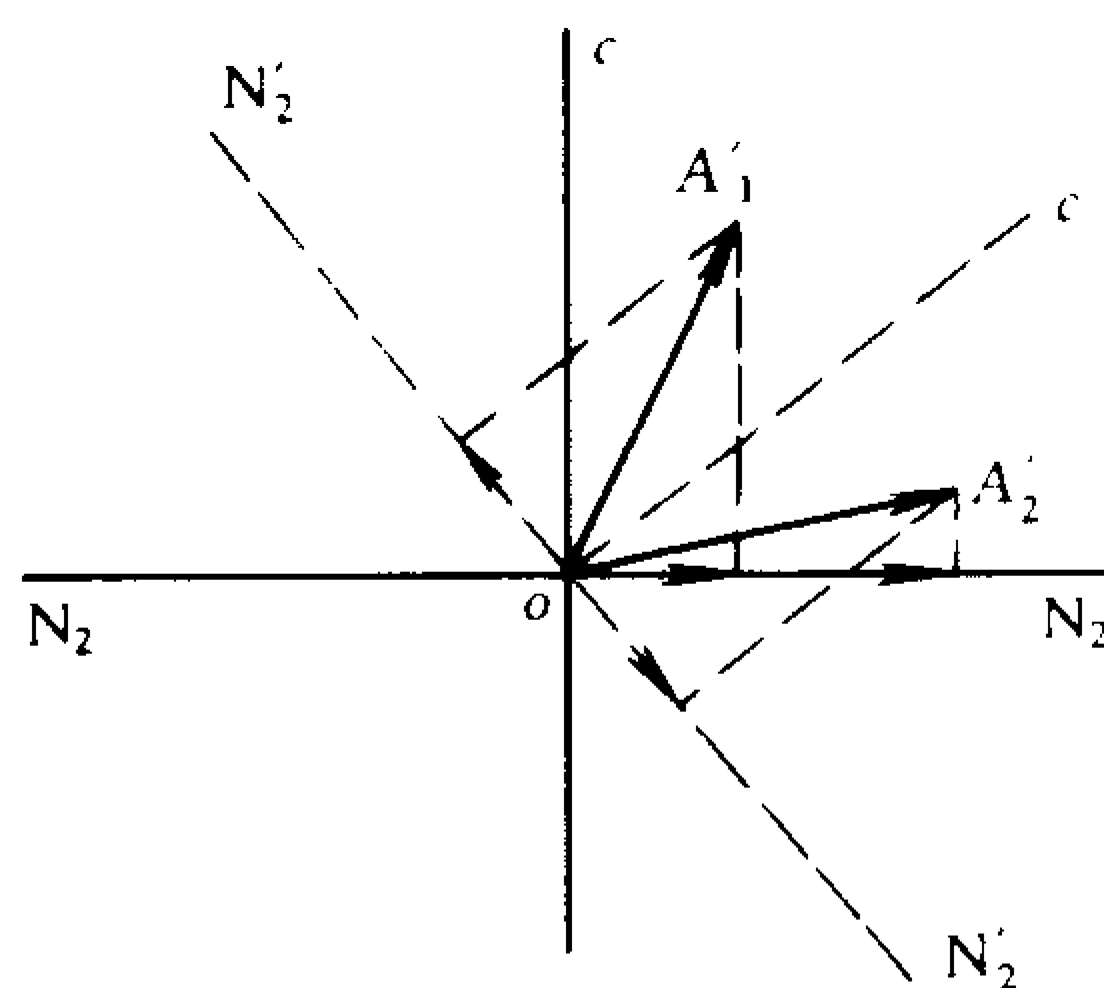


图 11－11

实验内容

1. 测定旋光计的零点

将空管 H 置于旋光计中，并把钠灯 S 置于聚光镜 F 前，调节望远镜 T，使能清楚看到视场的分界线，然后旋转 N_2，直至视场中 A、B 两区域弱照度相等. 记录刻度盘 R 上的读数，重复十次，求其平均值，作为旋光计的零点 φ_0.

2. 用蒸馏水洗涤 H 后，装入待测浓度的蔗糖溶液，要装满勿使其有气泡，并放入旋光计，转动 N_2，使视场中 A、B 两区域的弱

照度再次相等，记录刻度盘 R 上的读数 φ_0'，重复十次，求其平均值.

3. 由 $\varphi_0' - \varphi_0$ 即得平面偏振光振动面的旋转角 φ，代入式(11－10)计算此溶液的质量浓度 c，并与配制溶液时的质量浓度比较.

实验时溶液的温度应维持在 20℃，ρ 之值取66.50°cm³/dm·g，当温度在 20℃ 以上时，则相对于 20℃，温度每升高 1℃，ρ 值中的 66.50°应相应减去 0.02°作为修正值.

复习思考题

1. 强度为 I 的自然光通过偏振片后，其强度 $I_0 < \frac{1}{2} I$，为什么？应用偏振片时，马吕斯定律是否适用，为什么？

2. 怎样才能产生左旋(右旋)椭圆偏振光？

实验十二　发光强度和光通量的测量

目的

1. 熟悉陆末(Lummer)－布洛洪(Brodhun)光度计的构造原理；
2. 掌握用光度计测定电灯的发光强度及光强分布曲线的方法；
3. 掌握用积分球测电灯的光通量的原理和方法.

原理

发光强度的测定是以照度定律为依据的. 按照照度定律，在点光源的情况下，假定光线垂直地照射在某一表面上，则该表面上的照度 E 与光源发光强度 I 成正比，而与光源到该表面的距离 r 的平方成反比，即

$$E = \frac{I}{r^2} \tag{12-1}$$

由式(12－1)知道，若采用比较法，使两个不同光源在光度计的某一个表面上产生的照度相等，如其中一个光源的发光强度为已知，另一光源的发光强度就可确定. 例如两个光源的发光强度分别为 I_1 和 I_2，它们到光度计的距离分别为 r_1 和 r_2(图 12－1)，

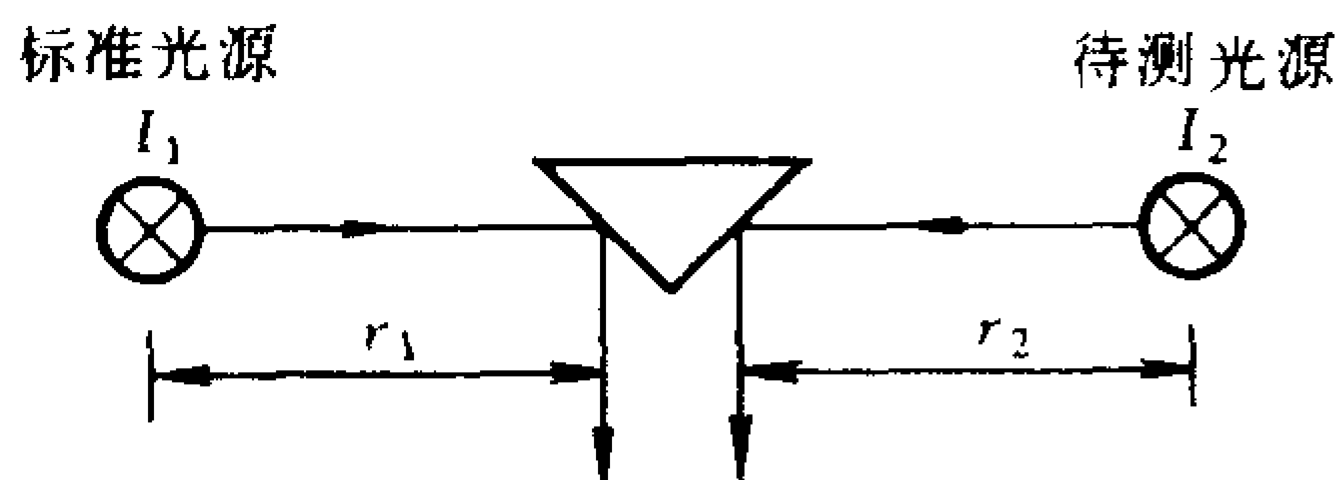


图 12－1

于是，当光度计中两相接视场上的照度相等($E_1 = E_2$)时，则有

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2} \tag{12-2}$$

由此可得

$$I_2 = I_1 \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (12-3)$$

通常用一已校验过的电灯作为标准灯(即其发光强度 I_1 是已知的),只要测出照度相等时的距离 r_1 和 r_2,就可根据式(12－3)算出待测电灯的发光强度 I_2.

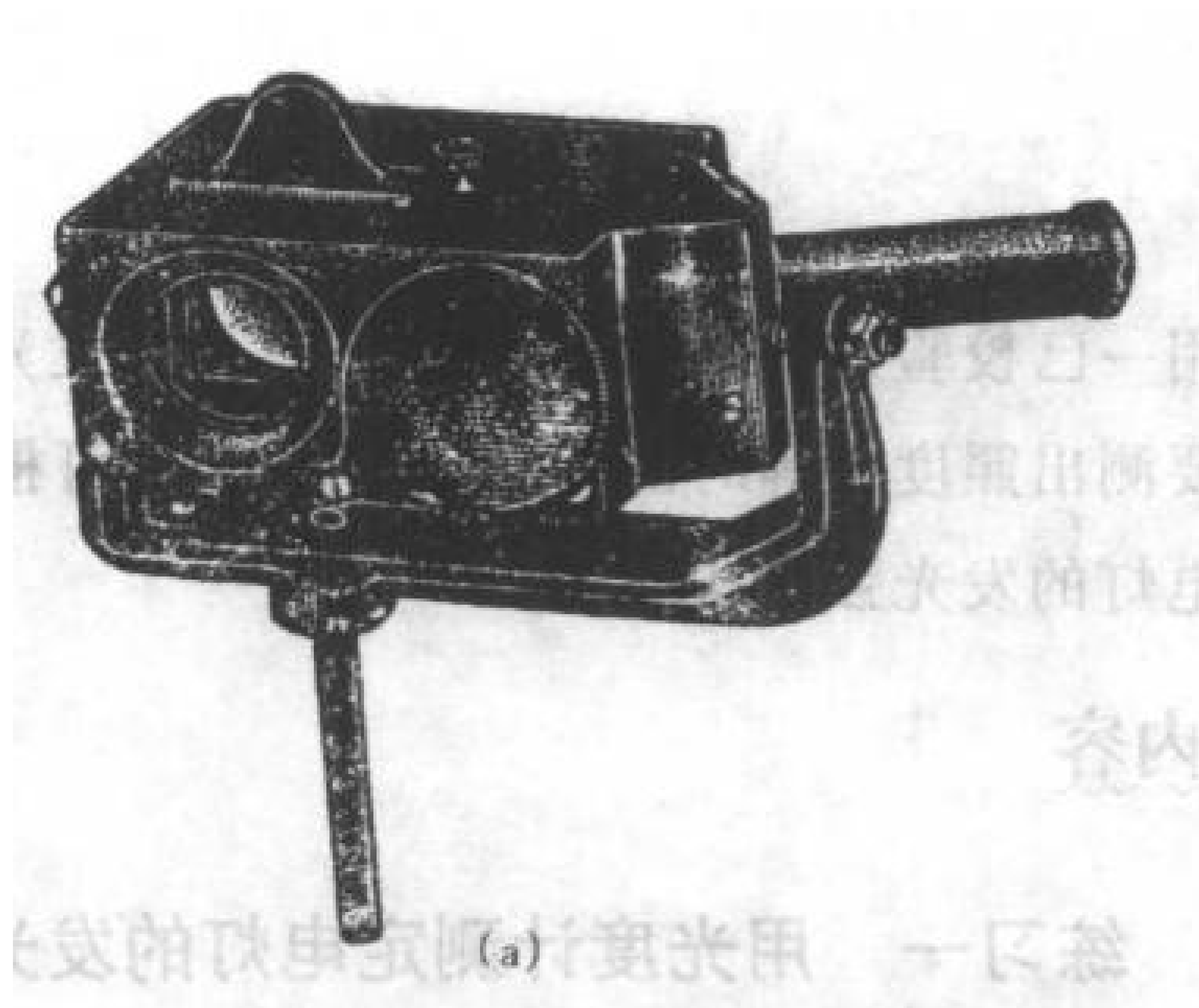
实验内容

练习一　用光度计测定电灯的发光强度及光强分布曲线

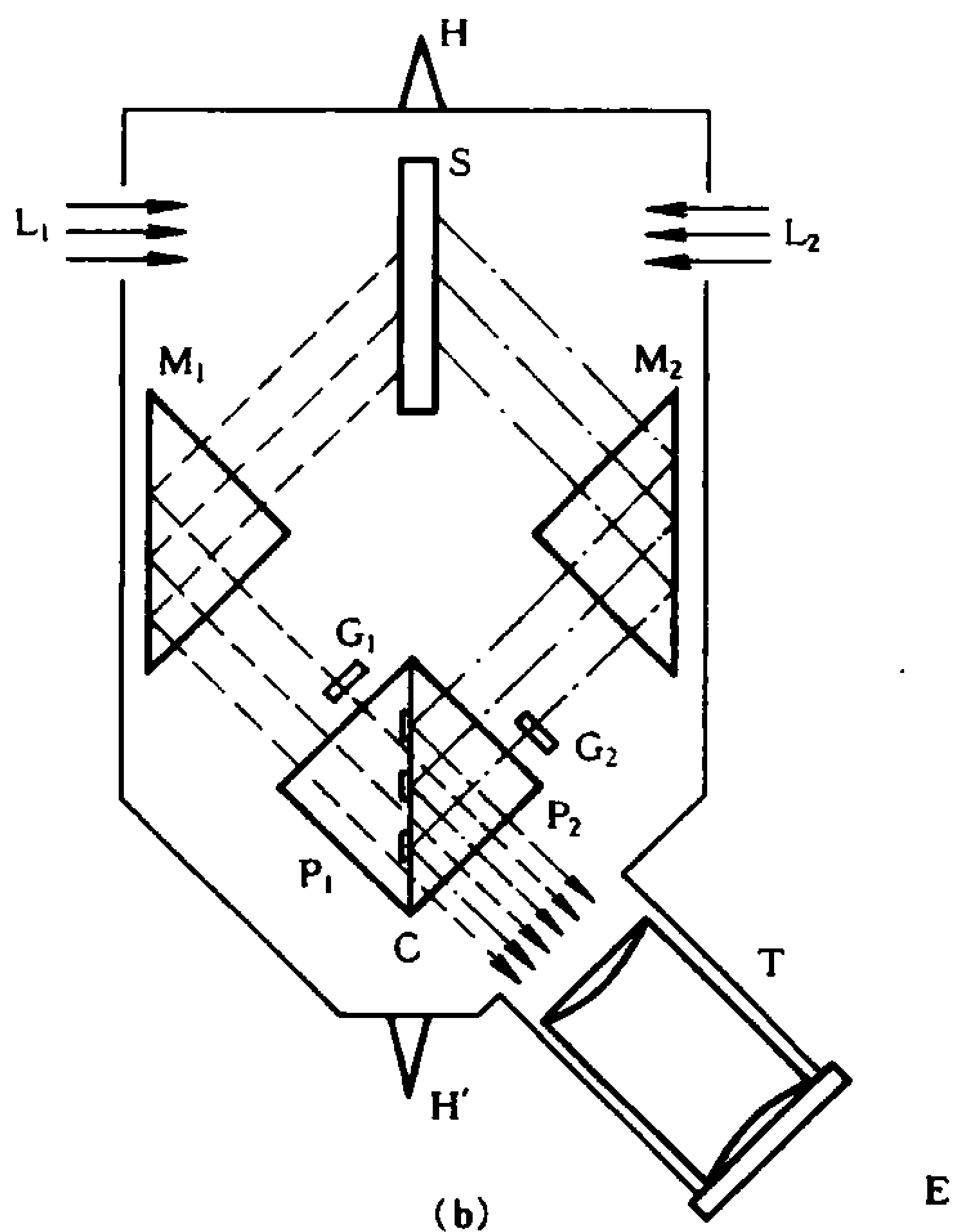
仪器和用具

陆末－布洛洪光度计,光具座,标准灯,待测灯,垂直灯座,附有刻度盘的灯座,交流伏特表(0～150/300 V)两只,交流安培表(0～0.5 A)两只,调压变压器两只,照度计.

基于比较法的光度计,都是使所要比较的两个光源(一个是标准的,另一个是待测的)所发出的光通过一定的光路分别照亮同一表面,并使这两个照亮区域的边缘相接,利用两区域照度相等时边界线消失的现象,定出待测光源的发光强度.光度计的种类很多,本实验使用的是陆末－布洛洪光度计,其外形和结构如图 12－2(a)和(b)所示意.从所比较的光源 L_1 及 L_2 来的光线,分别从左、右两窗孔进入匣内,并投射到石膏制成的漫射屏 S 上,由屏漫射出来的光线分别在两个全反射棱镜(或平面镜)M_1 和 M_2 上反射后投射到特制玻璃块 C 上.观察者 E 从侧面的望远镜 T 中可以同时观察到由屏 S 的两表面反射来的光线.玻璃块 C 是由两块直角棱镜 P_1 和 P_2 拼合而成,其中一块棱镜的斜面上蚀刻有一定的图形.如果漫射屏 S 的两面照度不相等,则蚀刻的图形将显现,如图



(a)



(b)

图 12－2

12－3(a)或(c)所示;当两面的照度相等时,图形就消失,如图12－3(b)所示. 图形中 A 与 a 为来自右方光源所照明的视场,B

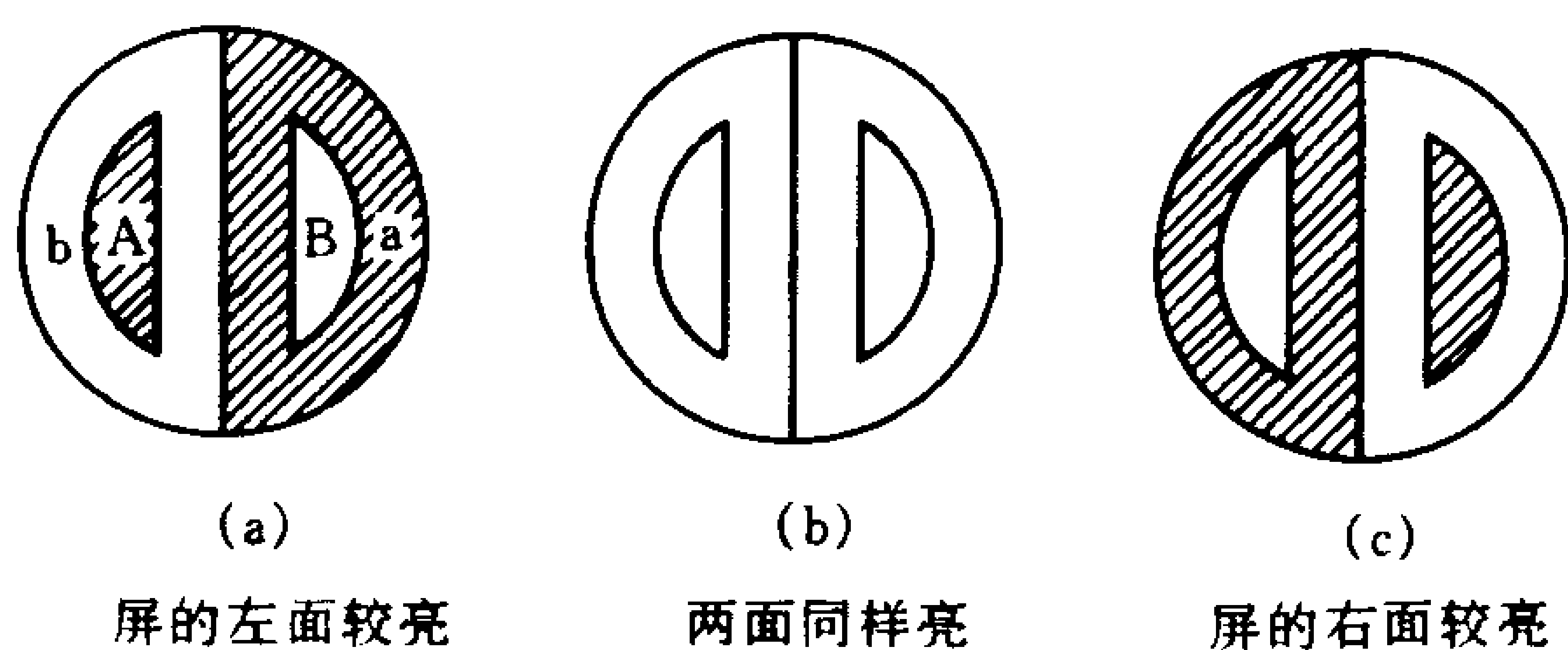


图 12－3

和 b 为来自左方光源所照明的视场，因四者互相衬托，其照度是否相等就更容易判断了．为了便于比较，另有两块可转动玻片 G_1、G_2 起着背景反衬的作用．

测量是通过比较漫射屏 S 的两面的亮度进行，如果两面的亮度相同，而其反射系数亦相等，则照度 E_1 等于照度 E_2．为了校正两个面的反射系数的差别，光度计可绕水平轴线 HH′ 翻转 180°，分别在两个位置进行测量，然后由这两组结果取其平均值．

测量

1．在光具座的两端插座上放好标准灯 L_1 和待测灯 L_2，使两光源在光具座上相距最远．其中标准灯安装在垂直灯座上，而待测灯安装在可绕水平轴线旋转且附有刻度盘的旋转灯座上竖放，如图 12－4 所示，并使指针对准刻度盘上 0°处．再在两灯之间放置光度计 P（图 12－5），调节两灯座的高度，使两灯与光度计的窗孔等高，以使光线能垂直投射到光度计的漫射屏上．

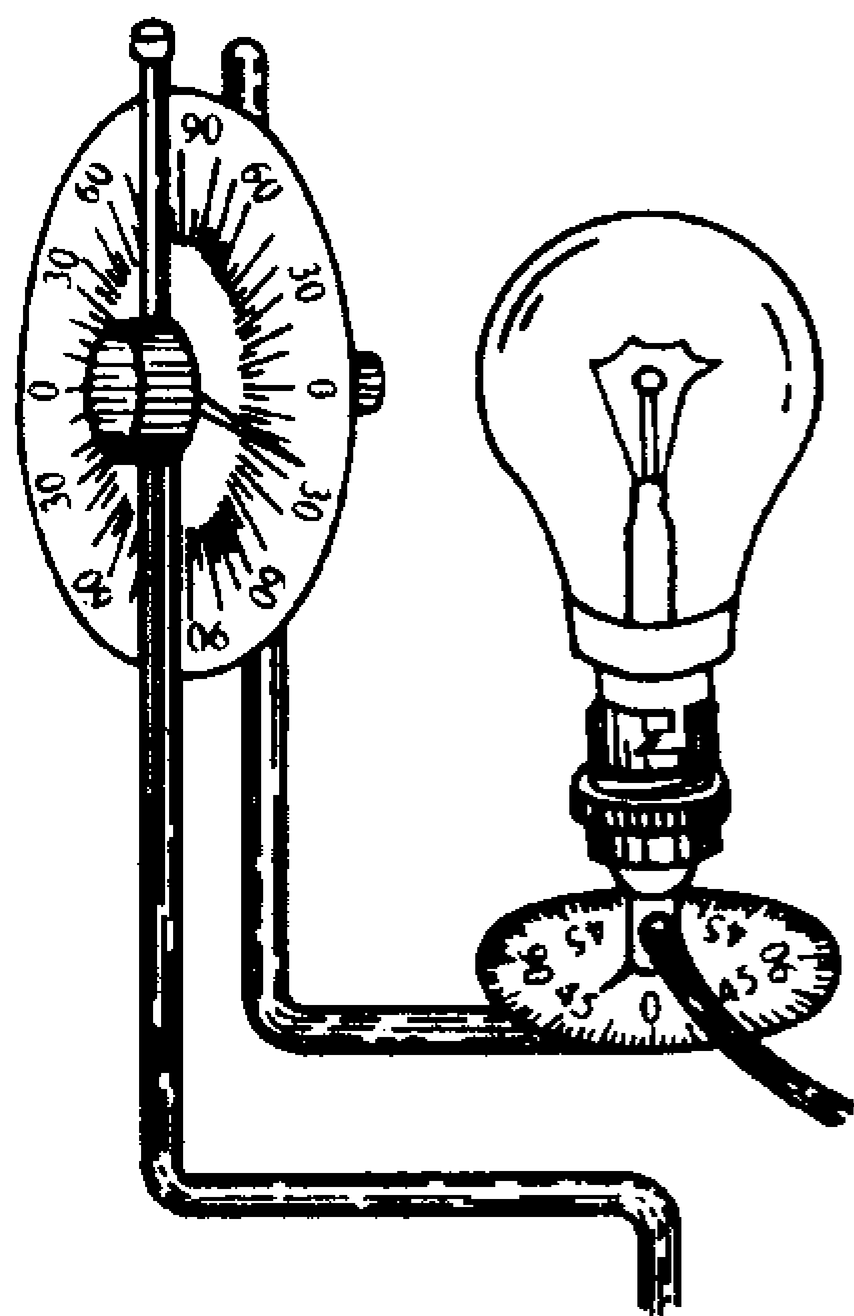


图 12－4

2. 按图 12－5 接好线路，调节调压变压器 T_1，使标准灯 L_1 的电压升至额定值(这样点燃，它的发光强度 I_1 才为已知)，并在实验过程中始终保持这电压不变；同时调节变压器 T_2，使待测灯 L_2 的电压保持在 220 V.

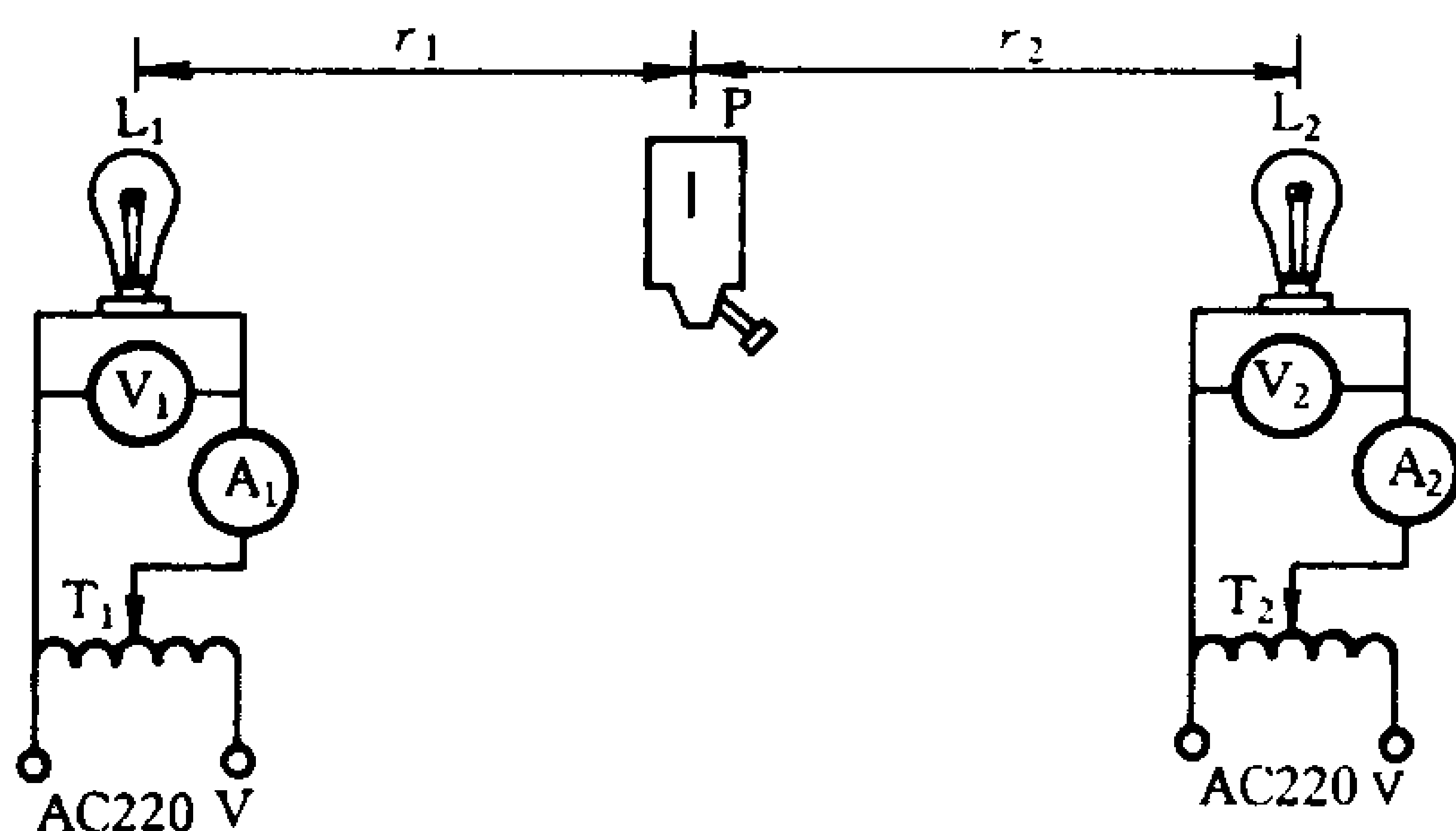


图 12－5

3. 在光度计 P 的两边光路中，各加一片相同波长的滤光片，以进行单色光度测量.

左右移动光度计 P，以使光度计中视场两部分的照度相等，从光具座的标尺上读出两光源与光度计之间的距离 r_1 和 r_2，然后把光度计绕水平轴转过 180°，再找出光度计中视场照度相等的位置，并读出两光源与光度计之间的距离 r'_1 和 r'_2. 由这两组数据取其平均值，并代入式(12－3)算出待测灯的发光强度 I_2.

保持标准灯至光度计的距离 r_1 不变，只改变待测灯的位置，重复实验三次，测出待测灯的发光强度(取平均值).

4. 转动灯座，使待测灯绕水平轴转过一角度，仿照上述步骤，测出光度计中视场照度相等时待测灯与光度计之间的平均距离 r_2，并根据式(12－3)算出待测灯 L_2 在它对于光度计所处的方位上的发光强度. 每次旋转 30°，直至转动一圈，即可得到待测灯在铅直面内各个方向上的发光强度. 以径矢长表示发光强度，将所得结果在极坐标纸上画出待测灯发光强度的分布

曲线.

5. 将待测灯 L_2 的方位固定,逐步改变其电压,每次 10 V,从 220 V 逐步降到 180 V,用光度计测出每个电压值时灯 L_2 的发光强度 I,并记下各次伏特表 V_2 和安培表 A_2 的读数,算出每次测量时的电功率 W. 以电功率 W 为横坐标,该特定方向的发光强度 I 为纵坐标,画出发光强度与电功率的关系曲线.

6. 换用另一波长的单色滤光片,同上法测定该波长的单色发光强度与电功率的关系曲线. 并和步骤 5 的测定结果进行比较(画在同一坐标纸上). 说明差异的原因.

光度测量时,如果依靠人眼近似观察和判断,则称为主观光度测量法,它虽然简单易行,但实验者的判断能力和视力状态均会影响观测结果. 特别是待测光源与标准光源的工作条件不同时,因光源辐射的温度不一样,发光的颜色也有明显差别,因而使用目视比较时,光度计视场里照度是否平衡无法判断. 给测量带来不便和困难. 因此,若相互比较的两个光源光色不同时,通常解决的办法是:

1. 在待测光源前加一滤光液槽(内装浓度可调的黄色和蓝色溶液),人为地降低或升高待测光源的色温,使与标准光源的色温相同,再用目视方法进行比较,测量待测光源的色温度.

2. 在比较光度的测量光路中,通过单色滤光片测定光源的单色光强度,本实验练习一即采用单色光度测量法.

3. 采用客观光度测量,即使用光电探测器代替人眼视觉,将光讯号转换为电讯号. 进行客观准确的测量. 因光电探测器光谱灵敏度经过滤色器的校正,与人眼视见函数相近,故用这种测量方法代替目视法,可以避免观测者个人状态对测量准确性的影响(见本实验练习二).

练习二　用积分球光度计测量电灯的光通量

仪器和用具

积分球光度计，光通量标准灯，待测灯，硒光电池，灵敏电流计，微安表，负载电阻，调节电位器，交流稳压电源，调压变压器，交流电流表，交流电压表，可变电阻.

根据发光强度 I 的定义，$I=\dfrac{d\Phi}{d\Omega}$. 对点光源来说，$I=\dfrac{\Phi}{4\pi}$. 所以，测定了光通量 Φ，也就可以知道光源的发光强度.

积分球光度计又称为光通球或简称积分球，是一种利用比较法将待测灯与光通量为已知的标准灯进行比较来测量光源总光通量的仪器. 积分球是用金属或其它材料制成的球壳，其大小主要决定于待测灯的尺寸和功率，一般实验室用的积分球直径为半米或一米，其结构如图 12-6 所示. 积分球的壳体(1)，其半径为 R，

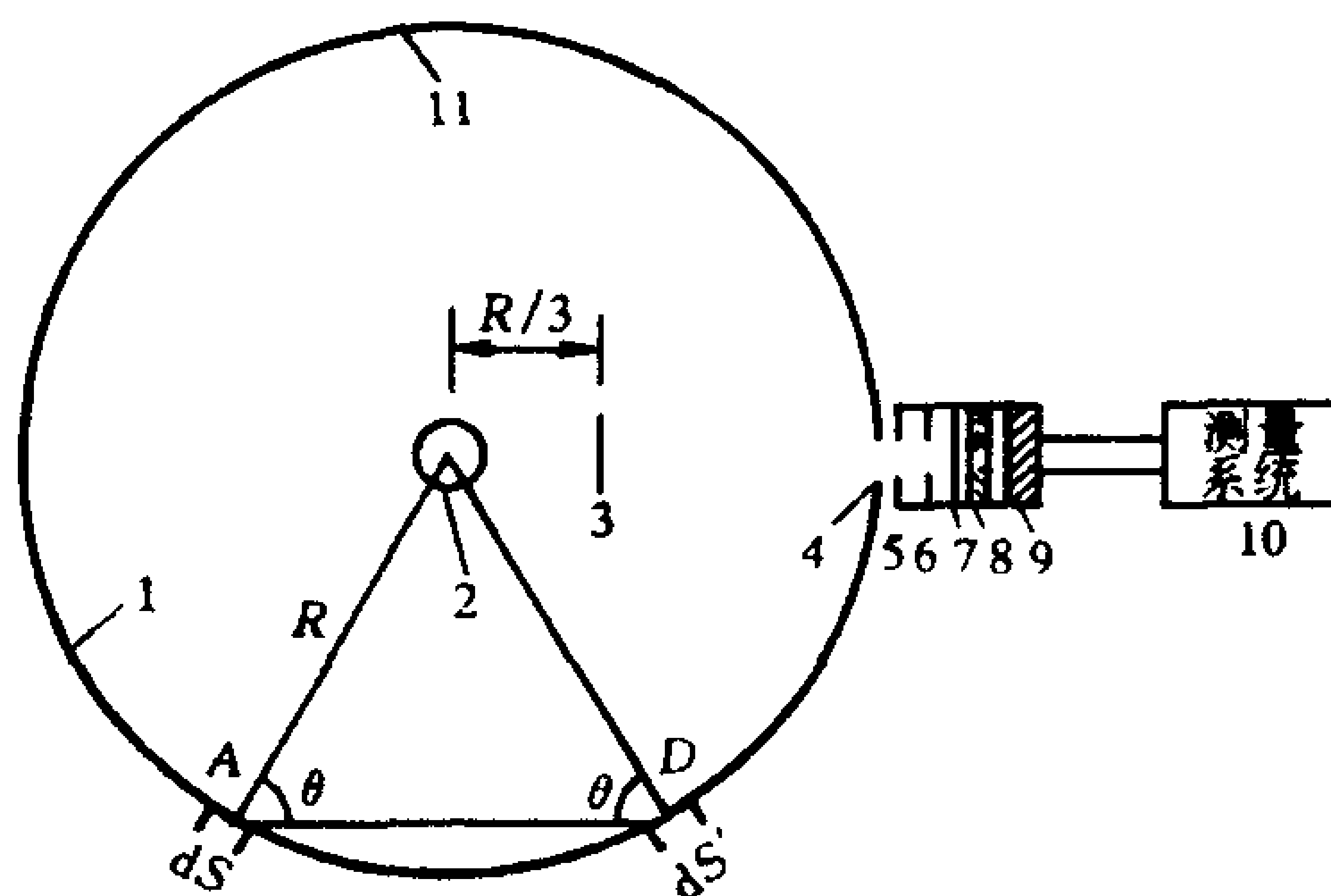


图 12-6

其内表面十分光滑圆整，被均匀地喷涂一层硫酸钡或氧化镁涂料，而成为一完全漫射体. 光源(2)(标准灯或待测灯)置于球心. 挡屏(3)位于球心与观测窗口(4)的连线上，离球心 $R/3$ 处，它的作

用是挡住灯光的直接照射. 窗口(4)罩有毛玻璃(或乳白玻璃),其内表面与球壳体的内表面相平. (5)为可变光阑,应尽量靠近毛玻璃,用以调节射到接收器表面的光通量. (6)为快门. (7)为减光器,用以调节接收器输出的光电流,其透光特性必须与波长无关,一般用中性灰玻璃(或毛玻璃). (8)为修正液槽(或特种滤光片),用以修正接收器的光谱灵敏度,使之与人眼的平均视见函数一致. (9)为光电接收器,例如硒光电池. (10)为测量系统. (11)为积分球的门.

假定在积分球球心处放置光源,其辐射光通量为 Φ,球的内表面涂料的反射率为 ρ,且处处相等(为提高测量精度,ρ 愈大愈好). 如果从光源直接射出的光线在球壁上任意一点 A 处面元 $\mathrm{d}S$ 上产生的光照度为 E_1,并设想 A 为一个次级发光体,则其面发光度为 ρE_1. 面元 $\mathrm{d}S$ 上的亮度为

$$B = \frac{1}{\pi}\rho E_1 \tag{12-4}$$

从面元 $\mathrm{d}S$ 发出的、沿与 $\mathrm{d}S$ 法线成 θ 角方向的立体角 $\mathrm{d}\Omega$ 内的一次漫射光通量为

$$\mathrm{d}\Phi = B\mathrm{d}S\cos\theta\mathrm{d}\Omega \tag{12-5}$$

它在球面上另一点 D 处的面元 $\mathrm{d}S'$ 上所产生的二次光照度为

$$\mathrm{d}E_2 = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}S'}$$

利用式(12-5)和下列关系式:

$$\mathrm{d}\Omega = \frac{\mathrm{d}S'\cos\theta}{AD^2}; \qquad AD = 2R\cos\theta$$

可得

$$\mathrm{d}E_2 = \frac{B\mathrm{d}S}{4R^2} = \frac{\rho E_1\mathrm{d}S}{4\pi R^2} \tag{12-6}$$

在 D 点处产生的二次光照度不是仅来源于 $\mathrm{d}S$,而是来源于整个球面,所以,D 点的全部二次光照度应为

$$E_2 = \int_S \mathrm{d}E_2 = \frac{\rho}{4\pi R^2}\int_S E_1 \mathrm{d}S$$

而$\int_S E_1 \mathrm{d}S$就是光源直接照射到球面上的全部光通量 Φ. 所以二次光照度 $E_2 = \frac{\rho}{4\pi R^2}\Phi$;同理,可求出整个球面的二次漫射光在 D 点产生的三次光照度 $E_3 = \rho E_2 = \frac{\rho^2}{4\pi R^2}\Phi$;…;第 i 次光照度 $E_i = \frac{\rho^{i-1}}{4\pi R^2}\Phi$;…等. 就一扩展漫射体而言,在各方向上的光照度并非等值,故其发射(或反射)的总光通量须用积分法求出. 积分球的名称就是来源于此.

因此,球面上任一点的全部光照度为

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 + \cdots + E_i + \cdots \\ &= E_1 + \frac{\Phi}{4\pi R^2}(\rho + \rho^2 + \cdots + \rho^{i-1} + \cdots) \\ &= E_1 + \frac{\Phi}{4\pi R^2}\sum_{i=1}^{\infty}\rho^i \\ &= E_1 + \frac{\Phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho} \end{aligned} \tag{12-7}$$

在观测窗口处如果用一小屏挡住光源的直接照射,那么,$E_1 = 0$,则有

$$E = \frac{\Phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho} \tag{12-8}$$

对于一定的积分球而言,R 和 ρ 均为常数,因此,球表面任一点的光照度与光源的总光通量 Φ 成正比. 利用积分球光度计测量光源的光通量,就是基于此原理. 通常都是用比较法. 在球内分别点亮标准灯与待测灯,由光电接收器分别测出观测窗口的光照度 $E_{标}$ 与 $E_{测}$,由式(12-8)可知:

$$\Phi_{测} = \frac{E_{测}}{E_{标}}\Phi_{标} \tag{12-9}$$

式中 $\Phi_{测}$ 为待测灯的光通量，$\Phi_{标}$ 为标准灯的光通量. 如果光电接收器工作在线性区域，则它产生的光电流 $i_{标}$ 和 $i_{测}$ 分别与 $E_{标}$ 和 $E_{测}$ 成正比，因此

$$\Phi_{测} = \frac{i_{测}}{i_{标}}\Phi_{标} \qquad (12-10)$$

这样，只要分别测得待测灯和标准灯点燃时所对应的光电流 $i_{测}$ 和 $i_{标}$，就可根据已知的标准灯的光通量 $\Phi_{标}$ 计算出待测灯的光通量 $\Phi_{测}$.

知道了待测灯的光通量 Φ(单位为 lm)，同时测出待测灯相应的电功率 W(单位为 W)，即可求出待测灯的发光效率

$$\eta = \frac{\Phi}{W} \qquad (12-11)$$

测量

1. 以硒光电池为光电接收器，按图 12－7 接好接收器测量线路，并按图 12－8 接好光源控制线路，控制标准灯在额定值工作.

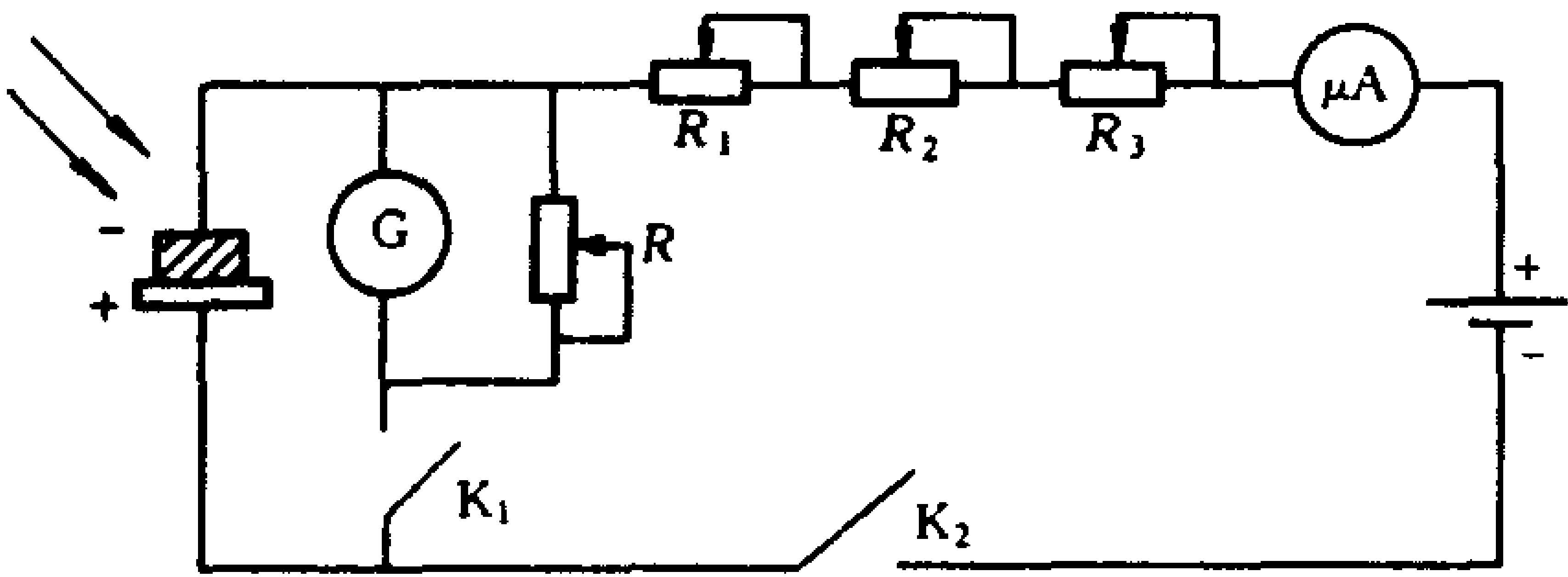


图 12－7 接收器测量线路

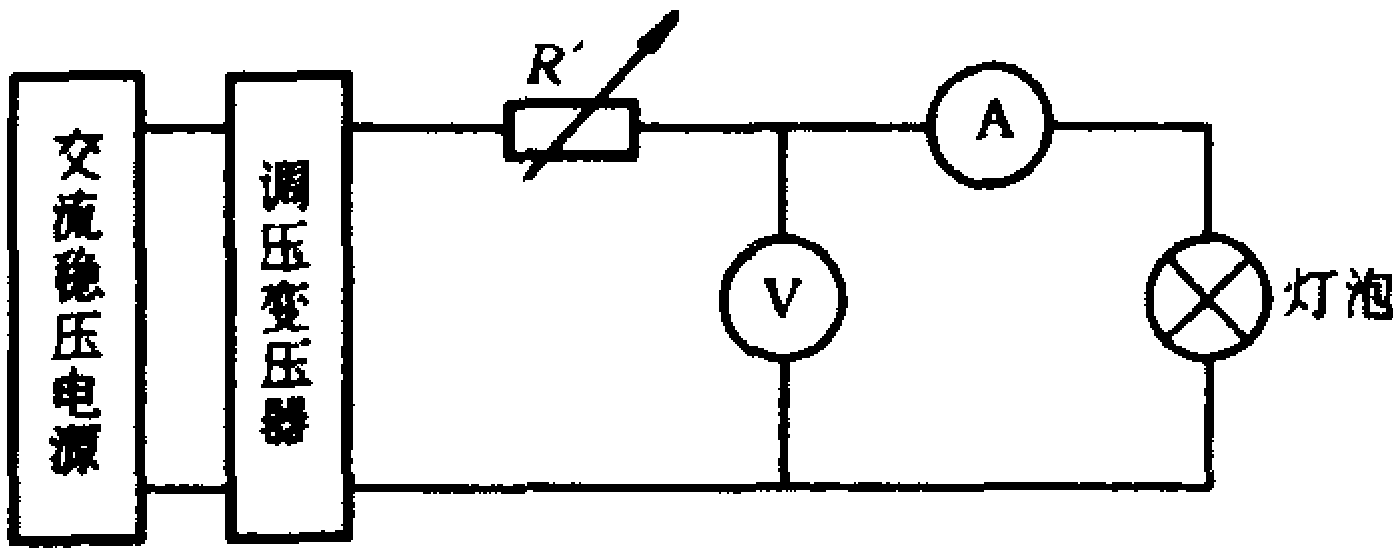


图 12－8 光源控制线路

根据硒光电池的光电转换特性，当硒光电池外电路负载电阻为零时，它所产生的光电流 i 与光照度 E 就有很好的线性关系（参阅§2－2）．因此，在实际使用中，常选用低内阻的电流计作测量仪表，或用图 12－7 所示的补偿平衡线路，以使硒光电池有较宽的线性工作范围．测量时，同时按下电键 K_1、K_2．调节可变电阻 R_1（R_2、R_3），使流过电流计的补偿电流与光电流的方向正好相反而数值相等．当电流计指零时，硒光电池相当于在外电路电阻为零的状态下工作，因而光电流与光通量（或光照度）有较好的线性关系．这时，微安表读数即表示光电流的大小．

2．分别点亮标准灯与待测灯，记录相应的光电流 $i_{标}$ 与 $i_{测}$，根据标准灯的已知光通量 $\Phi_{标}$ 计算待测灯的光通量 $\Phi_{测}$．

3．求出 $\Phi_{测}$ 后，按 $\Phi=4\pi I$ 计算待测灯的平均发光强度 I．

4．改变待测灯的电压，每次 10 V，从 220 V 逐步降低到 180 V，同时记录相应的电流值．计算对应于每个电压值时待测灯的平均发光强度 I、电功率 W 和发光效率 η．以电压 U 为横坐标，相应的发光效率 η 为纵坐标，作出待测灯发光效率与电压的关系曲线．

5．将相同功率的白炽灯和溴钨灯（或日光灯）分别作待测灯，测出其在额定电压时辐射的光通量，并计算其发光效率进行相互比较．

几点说明：

1．应用积分球测定光通量时，要求球的内壁是均匀的理想的漫反射层，遵从余弦辐射体的规律，漫反射层的涂料的反射率 ρ 与光波波长无关，且各点相同，测光窗口的透射率也应与光波波长无关，这些条件不可能完全满足，而且球内还有灯架、挡板等杂物的影响，因此，测量的理论公式（12－8）只是近似适用，但如果采用比较测量法，则可以减小这些因素的影响．

2. 测光用的积分球大小的选择，决定于待测光源的几何尺寸，通常，待测灯的尺寸应小于积分球体直径的$\frac{1}{10}\sim\frac{1}{6}$.

3. 由于目前所用标准灯的色温均为2 800 K，而待测光源的色温可以相差很大，因此，必须在光探测器(硒光电池)前加滤光片校正，使与人眼的视见函数$V(\lambda)$相近，否则对不同的色温必须进行理论校正.

4. 硒光电池在测量时，应使用低内阻电流计显示或采用补偿电路，使硒光电池具有较宽线性工作范围. 对强光进行测量时，可应用中性滤光片降低入射的光照度. 或使用高内阻型(无光照时，内阻为几十万欧)硒光电池，因它的积分灵敏度较低，但线性关系好.

复习思考题

1. 试从物体的辐射强度与温度的关系，解释实验中所得的发光强度与电功率的关系曲线.

2. 测量光通量时，为什么要校正光电池的光谱灵敏度与人眼的视见函数相一致？不校正，对测量有何影响？

3. 如果待测灯与标准灯的色温不相同，测量时为什么要进行色温校正？

4. 设计一个实验方法，用于测定日光灯的强度分布曲线(配光曲线).

实验十三　利用光电效应测定普朗克常量

目的

1. 通过实验加深对光的量子性的了解；

2. 通过光电效应实验，验证爱因斯坦方程，并测定普朗克常量.

仪器和用具

汞灯，干涉滤光片（404.7 nm、435.8 nm，546.1 nm 和 577.0 nm），光电管，微电流放大器，透镜.

原理和仪器说明

当一定频率的光照射到某些金属表面上时，可以使电子从金属表面逸出，这种现象称为光电效应. 所产生的电子，称为光电子. 光电效应是光的经典电磁理论所不能解释的. 1905 年爱因斯坦依照普朗克的量子假设，提出了光子的概念. 他认为光是一种微粒——光子；频率为 ν 的光子具有能量 $\varepsilon = h\nu$，h 为普朗克常量. 根据这一理论，当金属中的电子吸收一个频率为 ν 的光子时，便获得这光子的全部能量 $h\nu$，如果这能量大于电子摆脱金属表面的约束所需要的脱出功 W，电子就会从金属中逸出. 按照能量守恒原理有：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2 + W \tag{13-1}$$

上式称为爱因斯坦方程，其中 m 和 v_{m} 是光电子的质量和最大速度，$\frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2$ 是光电子逸出表面后所具有的最大动能. 它说明光子能量 $h\nu$ 小于 W 时，电子不能逸出金属表面，因而没有光电效应产生；产生光电效应的入射光最低频率 $\nu_0 = W/h$，称为光电效应的

极限频率(又称红限). 不同的金属材料有不同的脱出功,因而 ν_0 也是不同的.

我们在实验中将采用"减速电势法"测量光电子的最大动能并求出普朗克常量 h. 实验原理如图 13－1 所示. 当单色光入射到光电管的阴极 K 上时,如有光电子逸出,则当阳极 A 加正电势,K 加负电势时,光电子就被加速;而当 K 加正电势,A 加负电势时,光电子就被减速. 当 A、K 之间所加电压(U)足够大时,光电流达到饱和值 I_m,当 $U \leqslant -U_0$,并满足方程

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv_m^2 \tag{13-2}$$

时,光电流将为零,此时的 U_0 称为截止电压. 光电流与所加电压的关系如图 13－2 所示.

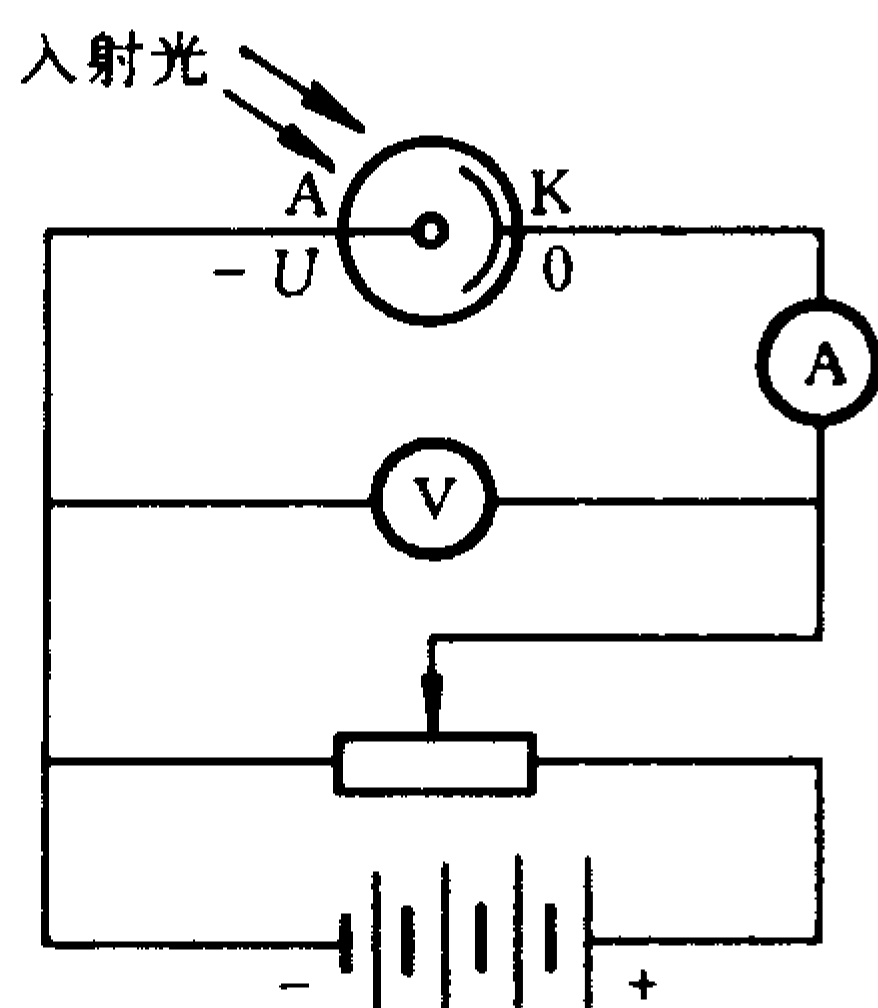


图 13－1

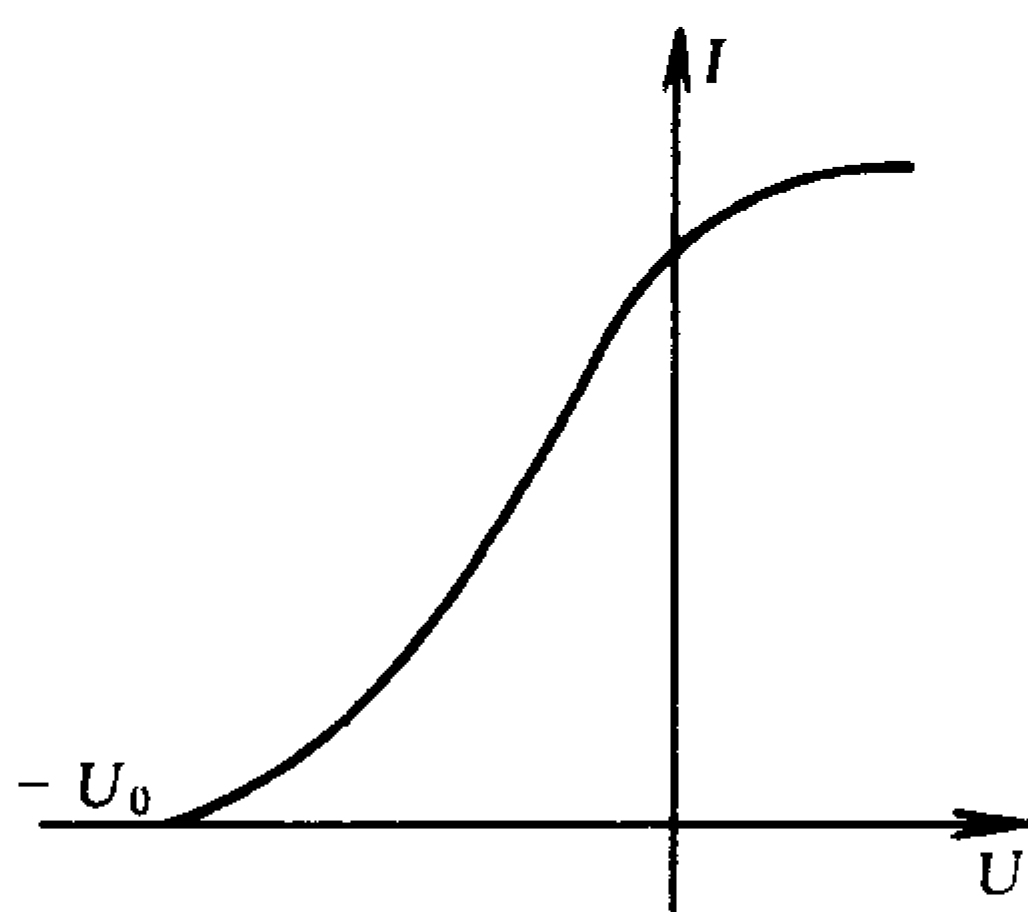


图 13－2

将式(13－2)代入式(13－1)可得

$$eU_0 = h\nu - W$$

即
$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \tag{13-3}$$

它表示 U_0 与 ν 间存在线性关系,其斜率等于 h/e,因而可以从对 U_0 与 ν 的数据分析中求出普朗克常量 h.

实际实验时测不出 U_0,测得的是

$$U'_0 = U_0 - U_c$$

式中 U_c 是导线和阴极间的正向接触电势差. 将此代入式(13-3),可得

$$U'_0 = \frac{h}{e}\nu - \left(U_c + \frac{W}{e}\right) \qquad (13-4)$$

由于 U_c 是不随 ν 而变的常量,所以 U'_0 与 ν 间也是线性关系(图 13-3),测量不同频率光的 U'_0 值,可求得此线性关系的斜率 b,由于

$$b = \frac{h}{e}$$

所以

$$h = be \qquad (13-5)$$

即从测量数据求出斜率 b,乘以电子电荷 $e(=1.602\times10^{-19}\text{C})$就可求出普朗克常量.

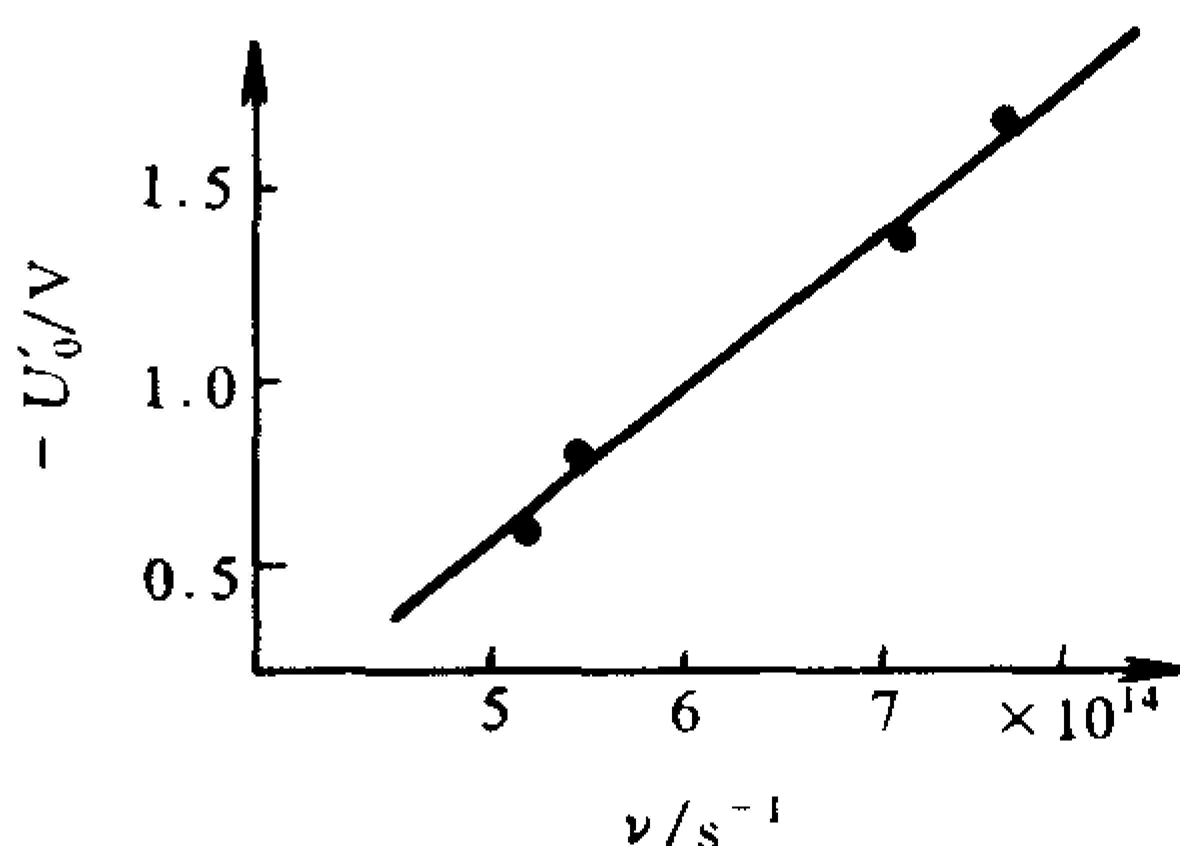


图 13-3

由光电效应测定普朗克常量 h,需要排除一些干扰,才能获得一定精度的可以重复的结果. 产生影响的主要因素如下:

1. 暗电流和本底电流

光电管在没有受到光照时,也会产生电流,称为暗电流,它是由热电流、漏电流两部分组成;本底电流是周围杂散光射入光电管所致,它们都随外加电压的变化而变化,故排除暗电流和本底电流的影响是十分必要的.

2. 反向电流

由于制作光电管时阳极 A 上往往溅有阴极材料，所以当光射到 A 上或由于杂散光漫射到 A 上时，阳极 A 也往往有光电子发射；此外，阴极发射的光电子也可能被 A 的表面所反射. 当 A 加负电势，K 加正电势时，对阴极 K 上发射的光电子而言起了减速作用，而对阳极 A 发射或反射的光电子而言却起了加速作用，使阳极 A 发出的光电子也到达阴极 K，形成反向电流.

这样实测的光电流应为阴极电流、暗电流和本底电流以及反向电流之和. 光电管的 $I-U$ 关系曲线将如图 13－4 中实线所示，由于反向电流和暗电流的存在，使得截止电压的测定变得困难.

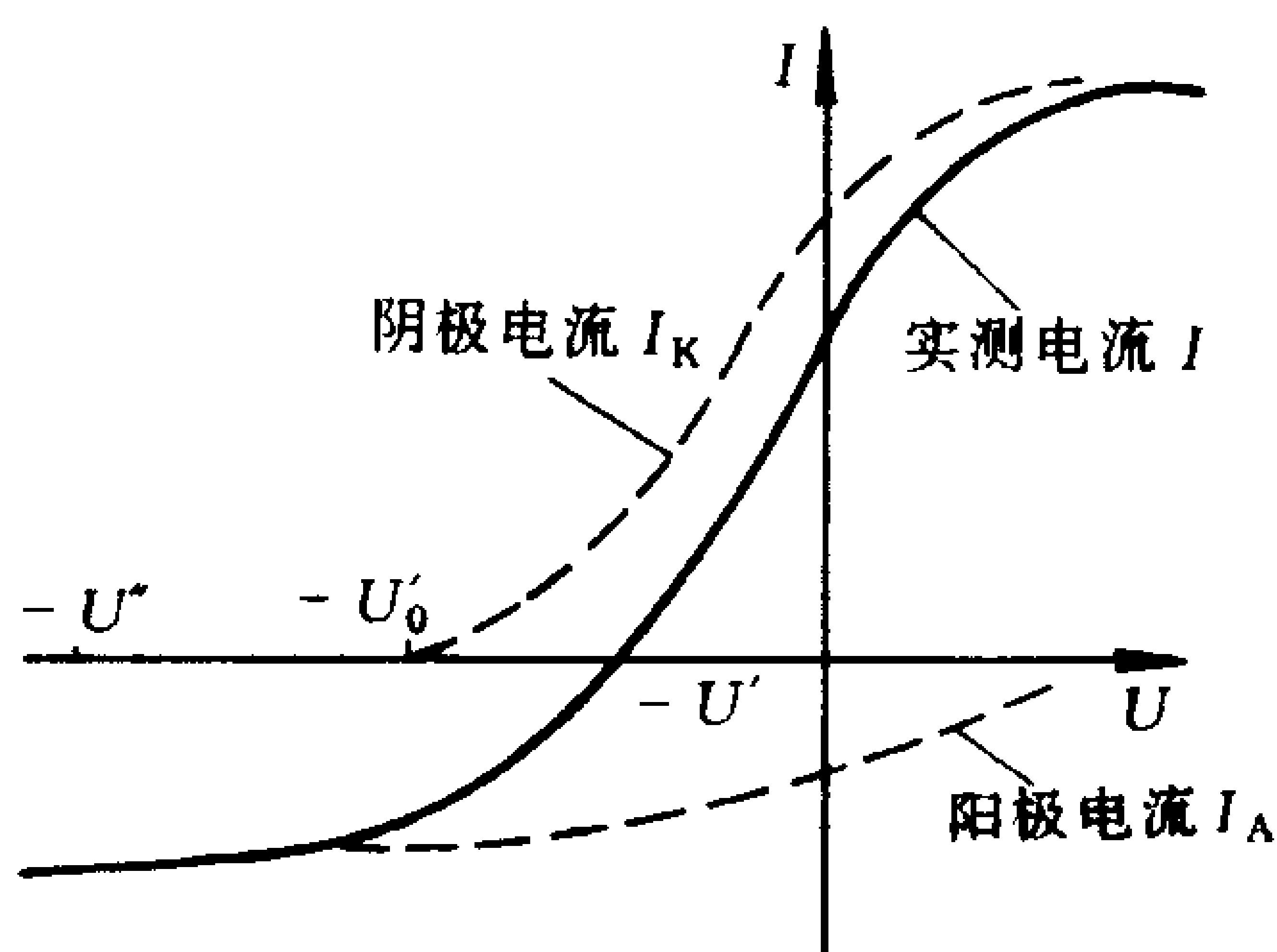


图 13－4

对于不同的光电管，应根据 $I-U$ 曲线的特点，选用不同的方法确定截止电压. 确定截止电压的方法一般有“交点法”和“拐点法”两种.

① 由图中曲线可见，由于反向电流的存在，当实测电流为零时，阴极光电流并不为零，特性曲线与 U 轴的交点电势 $-U'$ 也不是截止电压 $-U'_0$，但对于反向电流小，在截止电压附近阴极光电流上升得快的光电管，$-U'$ 就接近 $-U'_0$. 这种用交点电势 $-U'$ 代替截止电压 $-U'_0$ 的方法，称为“交点法”.

② 找出阳极电流刚刚饱和时的拐点电位 $-U''$，显然，它也不是截止电压 $-U'_0$. 对于阳极电流虽然较大，但饱和得快的光电管，$-U''$ 就接近 $-U'_0$，这种用阳极电流刚饱和时的拐点电势 $-U''$ 代替截止电压 $-U'_0$ 的方法称为"拐点法".

本实验用的光电管因阴极电流上升很快，阳极电流很小，故用交点法确定截止电压.

PCⅡ型普朗克常量测定仪(图 13－5)简介

本测定仪主要由光源(低压汞灯、限流器、光栏)、接收暗箱(光电管、干涉滤光片、成像透镜)以及微电流放大器(其中有光电管用的精密直流稳压电源)组成. 光源和接收暗箱安装在带有刻度尺的导轨上，可以根据实验需要调节二者之间的距离.

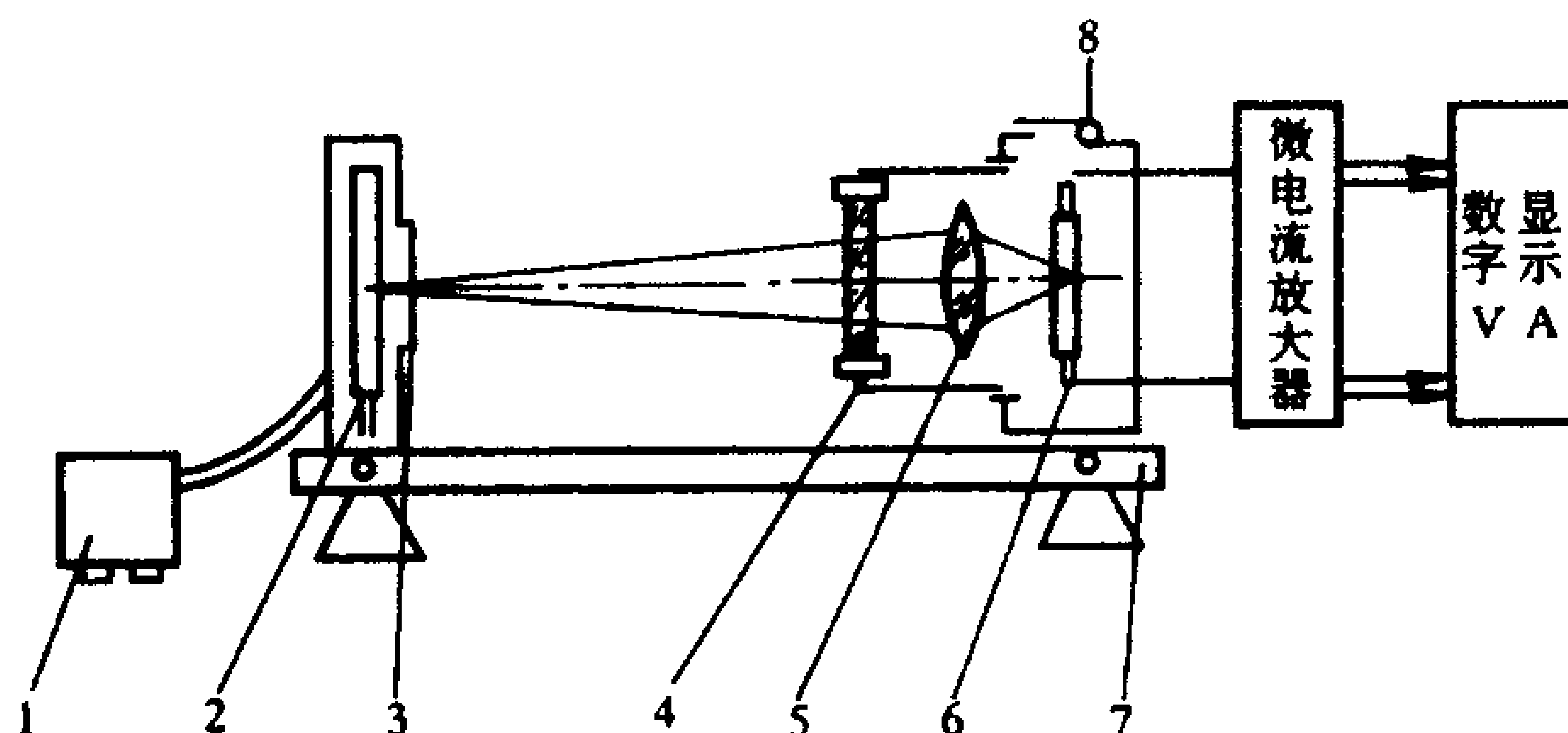


图 13－5

1. 汞灯限流器；2. 汞灯及灯罩；3. 光栏；4. 干涉滤光片(不用时为遮光盖)；5. 成像物镜；6. 光电管；7. 带刻尺导轨；8. 观察窗盖

(1) 光源采用 GP－20 Hg 型低压汞灯，光谱范围为 320.3～872.0 nm，汞灯灯罩前侧装有可变光栏，用于调节光源出射的光通量.

(2) 干涉滤光片

仪器配有四块干涉滤光片，它们对应于四条较强的 Hg 谱线，其

透射的波长分别为 404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm 和577.0 nm. 滤光片的有效通光孔径为 37 mm. 使用时,将滤光片插入接收暗箱的进光口处,以获得单色光照射光电管.

(3) 光电管

采用 1997 型专用光电管,阴极材料为银氧钾;光谱响应范围为 320～670 nm;最佳灵敏波长为(350 ± 20) nm;暗电流约 10^{-12}A;反向饱和电流与正向饱和电流之比小于 0.005.

(4) 微电流放大器

这是一种数字显示式微电流测试仪器,电流测量范围为 10^{-8}～10^{-13}A,分六挡十进变位,开机 60 min 后测量挡零点漂移不大于±2%;电压量程为 -2～+2 V 及 -200～+200 V 两挡;数显$3\frac{1}{2}$位,利用功能选择键分别显示电压值与电流值;光电管工作电源 -2～+2 V,由机内供给(如将外接电缆插头插入面板“外接电压”插孔,这时机内 -2～+2 V 电源自动断开,外接电压直接加在电压调节器上,机外输入电压范围为 0～200 V),精密可调,稳定度小于 0.1%.

机箱后设有 $X-Y$ 函数记录仪接线柱,可以与记录仪配合使用画出光电管 $I-U$ 特性曲线.

微电流放大器面板各部功能如图 13-6 所示.

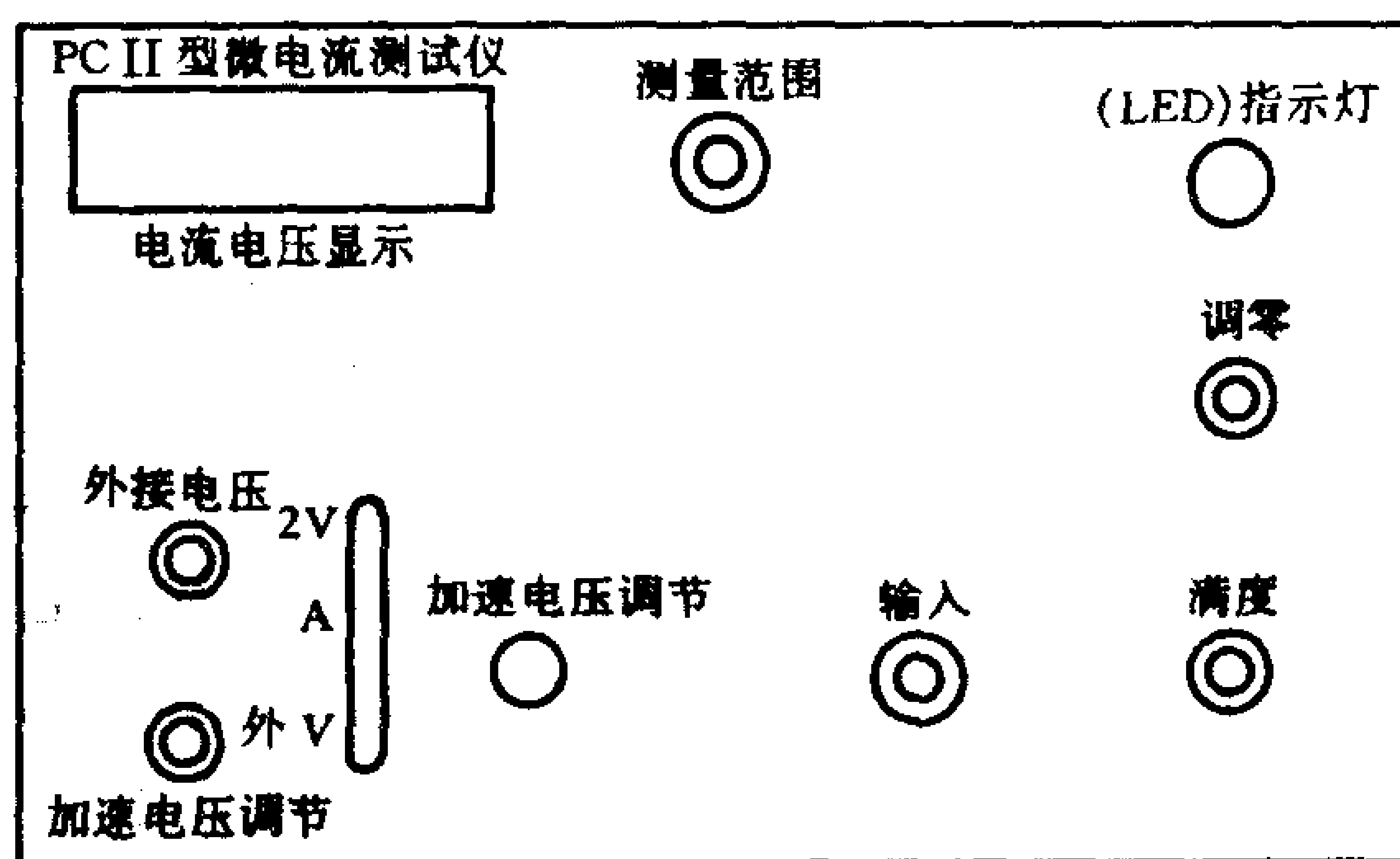


图 13-6

实验内容

1. 准备　点燃汞灯预热.

用专用电缆将微电流放大器的输入端与光电管输出端连结好,将光电管的加速电压输入端和放大器的加速电压输出端也连结好,接通电源,使放大器充分预热(一般为 20 min 左右).

2. 调整

(1) 将测量范围旋钮调到"短路",除去遮光孔罩,打开暗箱的观察窗,调整光源及物镜位置,使汞灯清晰地成像在光电管阳极圈中央部位,然后将遮光盖盖好.

(2) 将功能键拨至"A";旋转"调零"旋钮使放大器短路电流显示为"00.0",将"测量范围"旋钮转至"满度",旋转"满度"旋钮使电流值显示为"100.00". 然后将"测量范围"旋钮转至所需测量挡,再用调零电位器调整为"00.0".

3. 测定光电管暗电流特性曲线

将电表功能键拨至"2 V"挡,转动电压调节旋钮,使电表显示为 -2 V,将电表功能键拨至"A",转动"测量范围",旋钮至 10^{-12} 挡,这时数字表显示出该电压下的暗电流值. 按上述方法从 -2 V 至 0 V 之间每隔 0.2 V 测得相对应的电压和电流值作暗电流特性曲线.

4. 确定截止电压 $-U'_0$

(1) 除去遮光孔盖,装上波长为 404.7 nm 的滤光片,从 -2 V 开始,转动"加速电压"调节旋钮,按步骤 3 的方法每隔 0.1 V 记一次相对应的电压和电流值,作出光电流特性曲线(在特性曲线的转弯处,可每隔 0.05 V 记一次数据),找出光电流特性曲线与暗电流特性曲线的交点 $-U'_0$,即为波长 404.7 nm 时的截止电压.

(2) 按以上方法分别测得波长为 435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm时的光电流特性曲线,并求得相应的截止电压 $-U'_0$.

5. 计算普朗克常量 h

利用上面所得的数据,根据直线拟合(线性回归)的方法或图解法求出拟合直线的斜率 b 和普朗克常量 h.

6. 作 $I-U$ 特性曲线

注意事项

1. 应注意不使光照在光电管阳极上.

2. 测试时,如遇环境湿度较大,应将光电管和微电流放大器进行干燥处理,以减少漏电流的影响.

3. 测定截止电压时,电压的调节应平稳、缓慢,并以光电流为零时反向电压的最小值为该波长的截止电压. 如果所用光电管暗电流的测定值均很小,即暗电流可视为零,则只要在电流挡测试时,慢慢调节加速电压,使光电流显示为零,再将功能键拨至"2 V",所显示的电压值即为该单色光照射时的截止电压 $-U_0'$.

4. 平时应将光电管保存在干燥暗箱内,实验时也应尽量减少光照,实验后用遮光盖将进光孔盖住.

5. 对精密仪器应注意防震、防尘、防潮.

复习思考题

1. 做本实验时,如改变光电管上的照度,对 $I-U$ 曲线有何影响?

2. 光电管的阴极上均涂有脱出功小的光敏材料,而阳极则选用脱出功大的金属来制造,为什么?

实验十四　迈克耳孙干涉仪的调节和使用

目的

1. 掌握迈克耳孙干涉仪的调节和使用方法；

2. 调节和观察迈克耳孙干涉仪产生的干涉图，以加深对各种干涉条纹特点的理解；

3. 应用迈克耳孙干涉仪测定钠D双线平均波长和波长差.

仪器和用具

迈克耳孙干涉仪，钠灯，He－Ne激光器，低压汞灯，干涉滤光片(546.1 nm)，毛玻璃屏，叉丝，白炽灯.

原理及仪器描述

实验室中最常用的迈克耳孙干涉仪，其原理图和结构图如图14－1和14－2所示. M_1 和 M_2 是在相互垂直的两臂上放置的两个平面反射镜，其背面各有三个调节螺旋，用来调节镜面的方位；M_2 是固定的，M_1 由精密丝杆控制，可沿臂轴前后移动，其移动距离由转盘读出. 仪器前方粗动手轮分度值为 10^{-2} mm，右侧微动手轮的分度值为 10^{-4} mm，可估读至 10^{-5} mm，两个读数手轮属于蜗轮蜗杆传动系统. 在两臂轴相交处，有一与两臂轴各成45°的平行平面玻璃板 P_1，且在 P_1 的第二平面上镀以半透(半反射)膜，以便将入射光分成振幅近乎相等的反射光1和透射光2，故 P_1 板又称为分光板. P_2 也是一平行平面玻璃板，与 P_1 平行放置，厚度和折射率均与 P_1 相同. 由于它补偿了1和2之间附加的光程差，故称为补偿板.

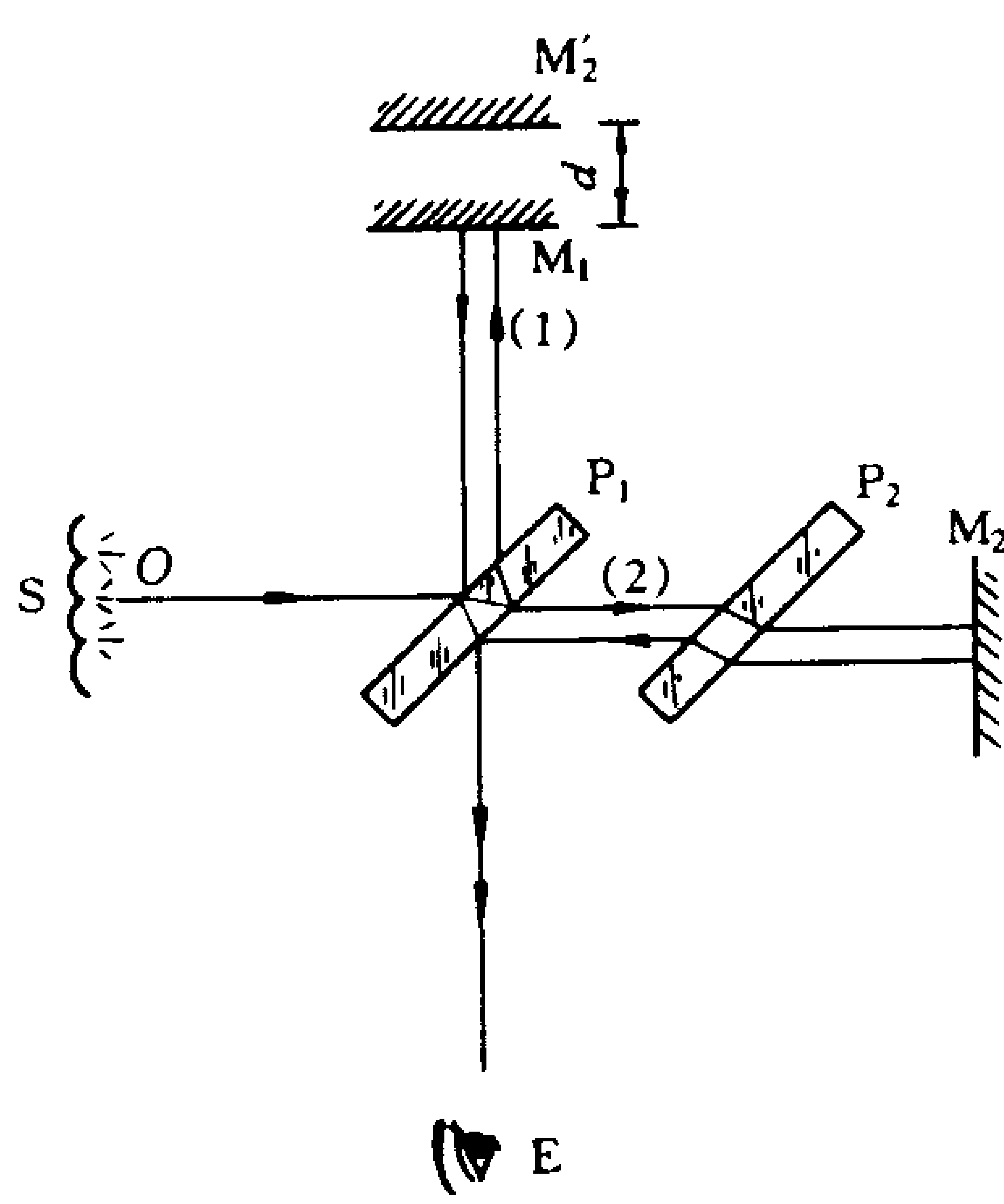


图 14－1

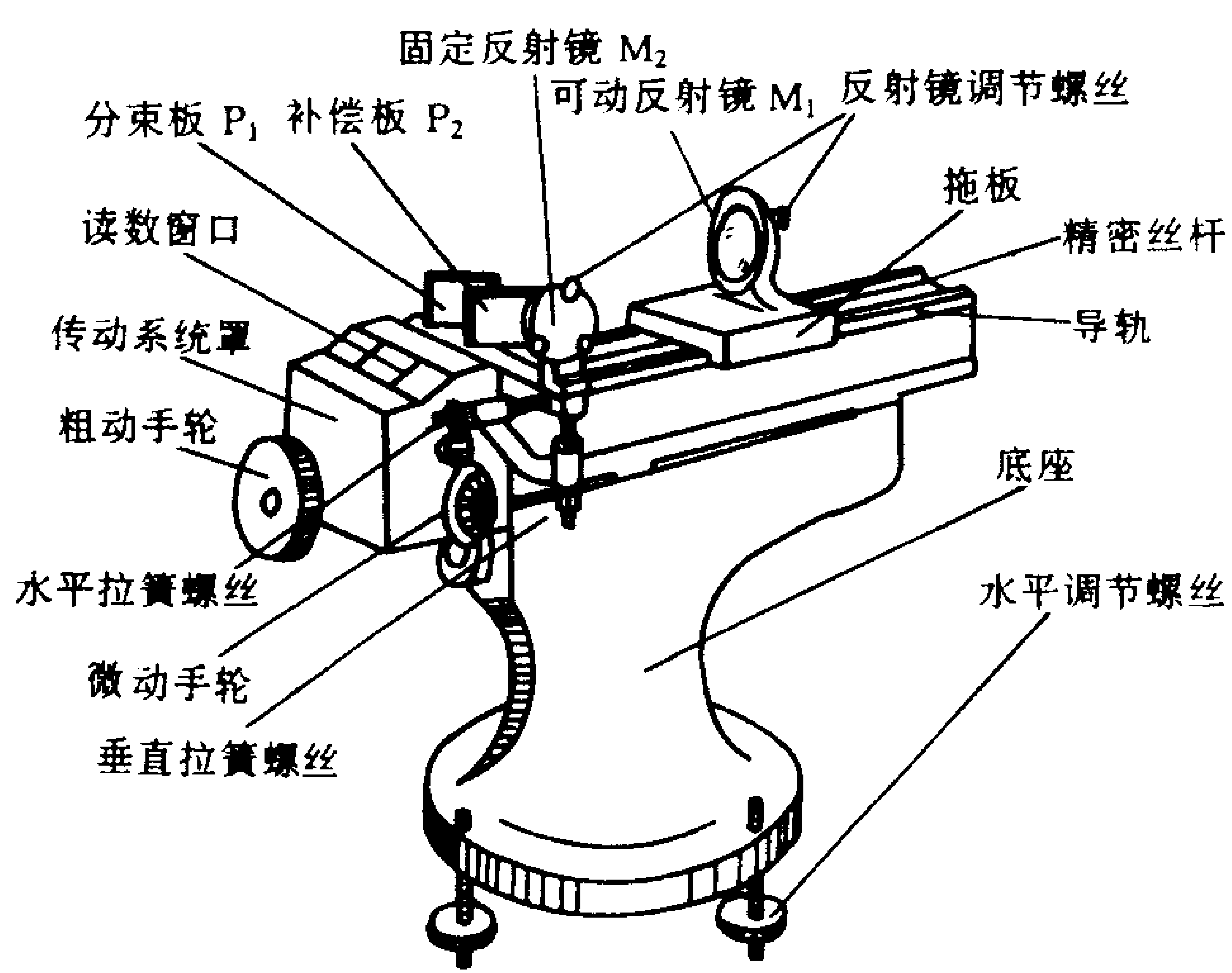


图 14－2

从扩展光源 S 射来的光，到达分光板 P_1 后被分成两部分. 反

射光 1 在 P_1 处反射后向着 M_1 前进；透射光 2 透过 P_1 后向着 M_2 前进．这两列光波分别在 M_1、M_2 上反射后逆着各自的入射方向返回，最后都到达 E 处．既然这两列光波来自光源上同一点 O，因而是相干光，在 E 处的观察者能看到干涉图样．

由于从 M_2 返回的光线在分光板 P_1 的第二面上反射，使 M_2 在 M_1 附近形成一平行于 M_1 的虚像 M_2'，因而光在迈克耳孙干涉仪中自 M_1 和 M_2 的反射，相当于自 M_1 和 M_2' 的反射．由此可见，在迈克耳孙干涉仪中所产生的干涉与厚度为 d 的空气膜所产生的干涉是等效的．

一、扩展光源照明产生的干涉图

1．当 M_1 和 M_2' 严格平行时，所得的干涉为等倾干涉．所有倾角为 i 的入射光束．由 M_1 和 M_2' 反射光线的光程差 Δ 均为

$$\Delta = 2d\cos i \tag{14-1}$$

式中 i 为光线在 M_1 镜面的入射角，d 为空气薄膜的厚度，它们将处于同一级干涉条纹，并定位于无限远．这时，在图 14－1 中的 E 处，放一会聚透镜，在其焦平面上(或用眼在 E 处正对 P_1 观察)，便可观察到一组明暗相间的同心圆纹．这些条纹的特点是：

(1) 干涉条纹的级次以中心为最高．在干涉纹中心，因 $i=0$，如果不计反射光线之间的相位突变，由圆纹中心出现亮点的条件

$$\Delta = 2d = k\lambda \tag{14-2}$$

得圆心处干涉条纹的级次

$$k = \frac{2d}{\lambda} \tag{14-3}$$

当 M_1 和 M_2' 的间距 d 逐渐增大时，对于任一级干涉条纹，例如第 k 级，必定以减少其 $\cos i_k$ 的值来满足 $2d\cos i_k = k\lambda$，故该干涉条纹向 i_k 变大($\cos i_k$ 变小)的方向移动，即向外扩展．这时，观察者将看到条纹好像从中心向外“涌出”；且每当间距 d 增加 $\lambda/2$

时，就有一个条纹涌出．反之，当间距由大逐渐变小时，最靠近中心的条纹将一个一个地“陷入”中心，且每陷入一个条纹，间距的改变亦为 $\lambda/2$．

因此，只要数出涌出或陷入的条纹数，即可得到平面镜 M_1 以波长 λ 为单位的移动距离．显然，若有 N 个条纹从中心涌出时，则表明 M_1 相对于 M_2' 移远了

$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2} \tag{14-4}$$

反之，若有 N 个条纹陷入时，则表明 M_1 向 M_2' 移近了同样的距离．根据式(14－4)，如果已知光波的波长 λ，便可由条纹变动的数目，计算出 M_1 移动的距离，这就是长度的干涉计量原理；反之，已知 M_1 移动的距离和干涉条纹变动的数目，便可算出光波的波长．

(2) 干涉条纹的分布是中心宽边缘窄

对于相邻的 k 级和 $k-1$ 级干涉条纹，有

$$2d\cos i_k = k\lambda$$

$$2d\cos i_{k-1} = (k-1)\lambda$$

将两式相减，当 i 较小时，并利用 $\cos i = 1-\frac{i^2}{2}$，可得相邻条纹的角距离 Δi_k 为

$$\Delta i_k = i_k - i_{k-1} \approx \lambda/2di_k \tag{14-5}$$

上式表明：① d 一定时，视场里干涉条纹的分布是中心较宽（i_k 小，Δi_k 大），边缘较窄（i_k 大，Δi_k 小）；② i_k 一定时，d 越小，Δi_k 越大，即条纹随着薄膜厚度 d 的减小而变宽．所以在调节和测量时，应选择 d 为较小值，即调节 M_1 和 M_2 到分光板 P_1 上镀膜面的距离大致相同．

2．当 M_1 和 M_2' 有一很小的夹角 α，且当入射角 i 也较小时，一般为等厚干涉条纹，定位于空气薄膜表面附近．此时，由 M_1 和 M_2' 反射光线的光程差仍近似为

$$\Delta = 2d\cos i = 2d\left(1 - \frac{i^2}{2}\right) \qquad (14-6)$$

(1) 在两镜面的交线附近处，因厚度 d 较小，$d \cdot i^2$ 的影响可略去，相干的光程差主要由膜厚 d 决定，因而在空气膜厚度相同的地方光程差均相同，即干涉条纹是一组平行于 M_1 和 M_2' 交线的等间隔的直线条纹.

(2) 在离 M_1 和 M_2' 的交线较远处，因 d 较大，干涉条纹变成弧形，而且条纹弯曲的方向是背向两镜面的交线. 这是由于式(14-6)中 $d \cdot i^2$ 的作用已不容忽略. 由于同一 k 级干涉条纹乃是等光程差点的轨迹. 为满足 $2d\left(1 - \frac{i^2}{2}\right) = k\lambda$，因此用扩展光源照明时，当 i 逐渐增大，必须相应增大 d 值，以补偿由 i 增大时引起光程差的减小. 所以干涉条纹在 i 增大的地方要向 d 增加的方向移动，使条纹成为弧形，如图 14-3 所示. 随着 d 的增大，条纹弯曲越厉害.

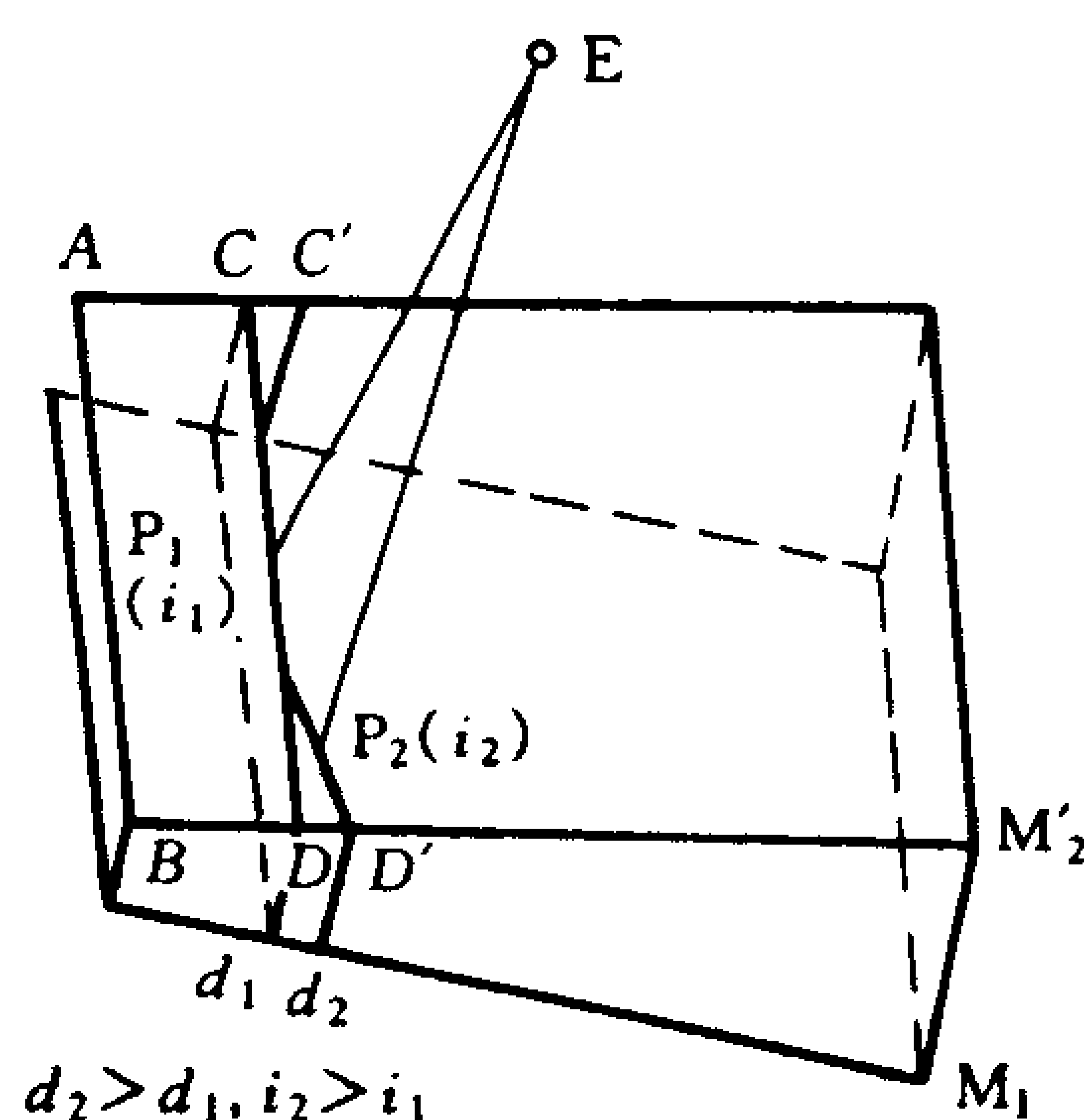


图 14-3

3. 白光照射下看到彩色干涉条纹的条件

对于等倾干涉，在 d 接近零时可以看到；

对于等厚干涉，在 M_1，M_2' 的交线附近可以看到. 因为在 $d=0$

时，所有波长的干涉情况相同，不显彩色．当 d 较大时因不同波长干涉条纹互相重叠，使照明均匀，彩色消失．只有当 d 接近零时才可看到数目不多的彩色干涉条纹．

二、点光源照明产生的非定域干涉图样

点光源S经 M_1 和 M'_2 的反射产生的干涉现象，等效于沿轴向分布的两个虚光源 S_1、S_2 所产生的干涉．因从 S_1 和 S_2 发出的球面波在相遇的空间处处相干，故为非定域干涉．如图 14－4 所示．激光束经短焦距扩束透镜后，形成高亮度的点光源S照明干涉仪．若将观察屏E放在不同位置上，则可看到不同形状的干涉条纹．

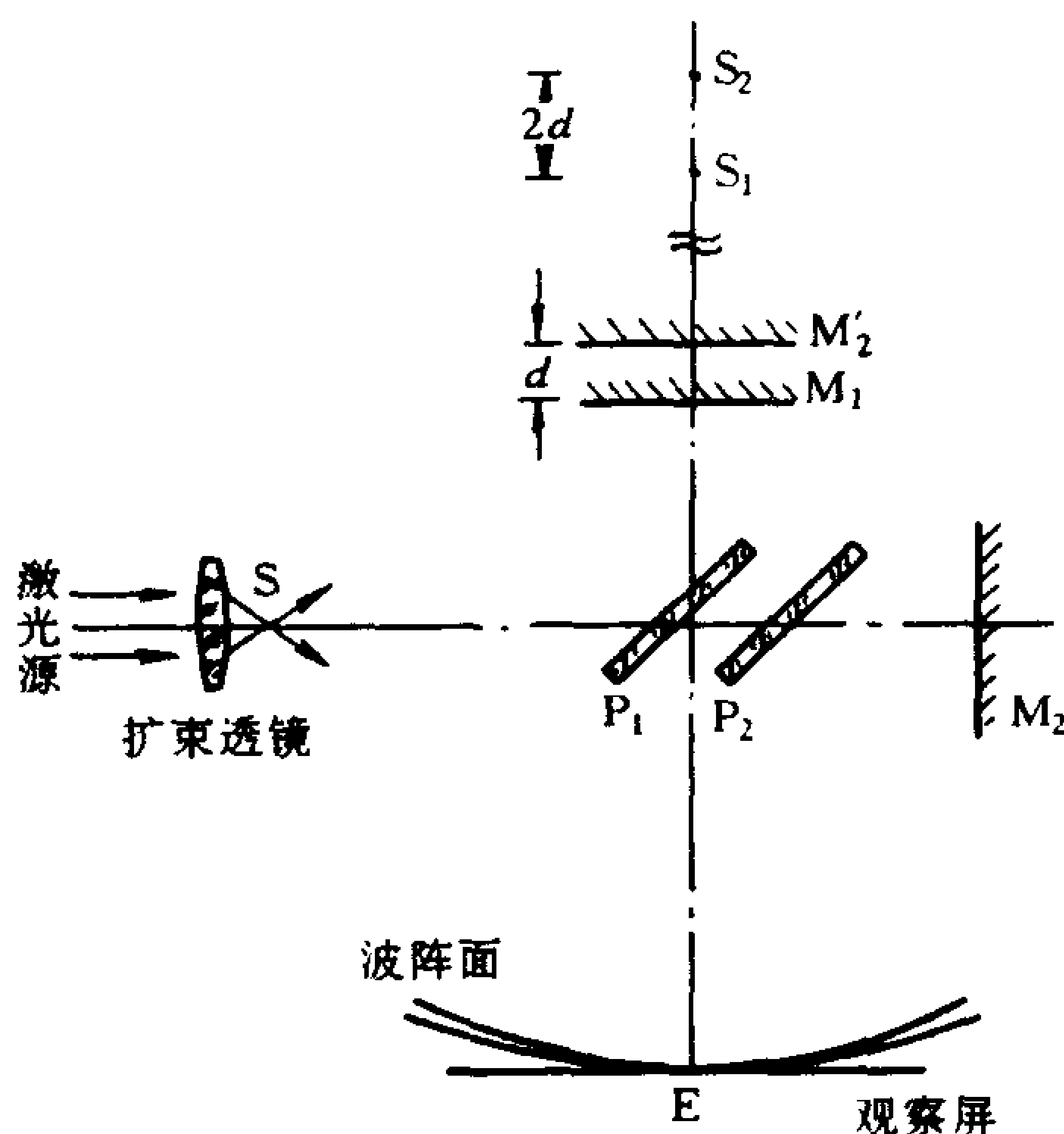


图 14－4

当观察屏E垂直于 S_1S_2 联线时，屏上呈现出圆形的干涉条纹．同等倾条纹相似，在圆环中心处，光程差最大，$\Delta=2d$，级次最高；当移动 M_1 使 d 增加时，圆环一个个地从中心“涌出”，当 d 减小时，圆环一个个地向中心“陷入”．每变动一个条纹，M_1 移动的

距离亦为 $\lambda/2$. 因此也可用以计量长度或测定波长.

实验内容

练习一　迈克耳孙干涉仪测钠光的波长

一、迈克耳孙干涉仪的调节

1. 点亮钠灯 S,使之照射毛玻璃屏,形成均匀的扩展光源,在屏上加一指针或带尖的黑纸片.

2. 旋转粗动手轮,使 M_1 和 M_2 至 P_1 镀膜面的距离大致相等,沿 EP_1 方向观察,将看到指针的双影.

3. 仔细调节 M_1 和 M_2 背后的三个螺丝,改变 M_1 和 M_2 的相对方位,直至双影在水平方向和铅直方向均完全重合,这时可观察到干涉条纹,仔细调节三个螺丝,使干涉条纹成圆形.

4. 细致缓慢地调节 M_2 下方的两个微调拉簧螺丝,使干涉条纹中心仅随观察者的眼睛左右上下的移动而移动,但不发生条纹的"涌出"或"陷入"现象. 这时,观察到的干涉纹才是严格的等倾干涉. 如果眼睛移动时,看到的干涉环有"涌出"或"陷入"现象,要分析一下再调.

二、测定钠光波长(D_1D_2 二波长的平均值)

1. 旋转粗动手轮,使 M_1 移动,观察条纹的变化. 从条纹的"涌出"或"陷入",判断 d 的变化,并观察 d 的取值与条纹粗细、疏密的关系.

2. 当视场中出现清晰的、对比度较好的干涉圆环时,再慢慢地转动微动手轮,可以观察到视场中心条纹向外一个一个地涌出(或者向内陷入中心). 开始记数时,记录 M_1 镜的位置 d_1(两读数转盘读数相加),继续转动微动手轮,数到条纹从中心向外涌出

100 个时,停止转动微动手轮,再记录 M_1 镜的位置 d_2,于是利用式(14-4)即可算出待测光波的波长 λ.

重复测量几次,取其平均值并计算不确定度,与公认值比较.

震动对测量的影响甚大,要注意!(干涉仪的三个底脚要加软垫.)

三、观察白光的彩色干涉条纹

参照原理部分的分析,思考以下几个问题:

1. 在等倾干涉中看到彩色干涉条纹(圆环)的条件是什么?
2. 移动 M_1,从看到的现象中,如何判断 d 是在增大还是在减小?
3. 向哪个方向移动 M_1 肯定会看到彩色干涉环?
4. 要在等厚干涉中看到彩色条纹,该考虑些什么问题?

先用钠灯看到等倾干涉环,移动 M_1,根据观察的现象认为 M_1 的移动方向正确时,改用白光源继续移动 M_1,直至看到彩色干涉环.

再调等厚干涉的彩色干涉条纹.

注意:由于白光的彩色条纹只有几条,必须耐心细致地缓慢调节微动手轮,如果移动过快,条纹极易一晃而过,难于察觉.

四、自行设计实验步骤,观察点光源照明干涉仪时,干涉条纹的形状、特点、观察条件和变化规律.

迈克耳孙干涉仪系精密光学仪器,使用时应注意:

1. 注意防尘、防潮、防震;不能触摸元件的光学面,不要对着仪器说话,咳嗽等.
2. 实验前和实验结束后,所有调节螺丝均应处于放松状态,调节时应先使之处于中间状态,以便有双向调节的余地,调节动作要均匀缓慢.

3. 有的干涉仪粗动手轮和微动手轮传动的离合器啮合时,只能使用微动手轮,不能再使用粗动手轮,否则会损坏仪器.

4. 旋转微动手轮进行测量时,特别要防止回程误差.

练习二　测定钠光 D 双线(D_1D_2)的波长差

原理

当 M_1 与 M_2' 互相平行时,得到明暗相间的圆形干涉条纹. 如果光源是绝对单色的,则当 M_1 镜缓慢地移动时,虽然视场中条纹不断涌出或陷入,但条纹的视见度应当不变.

设亮条纹光强为 I_1,相邻暗条纹光强为 I_2,则视见度 V 可表示为

$$V=(I_1-I_2)/(I_1+I_2)$$

视见度描述的是条纹清晰的程度.

如果光源中包含有波长 λ_1 和 λ_2 相近的两种光波,而每一列光波均不是绝对单色光,以钠黄光为例,它是由中心波长 $\lambda_1=589.0$ nm 和 $\lambda_2=589.6$ nm 的双线组成,波长差为 0.6 nm. 每一条谱线又有一定的宽度,如图 14-5 所示. 由于双线波长差 $\Delta\lambda$ 与中心波长相比甚小,故称之为准单色光.

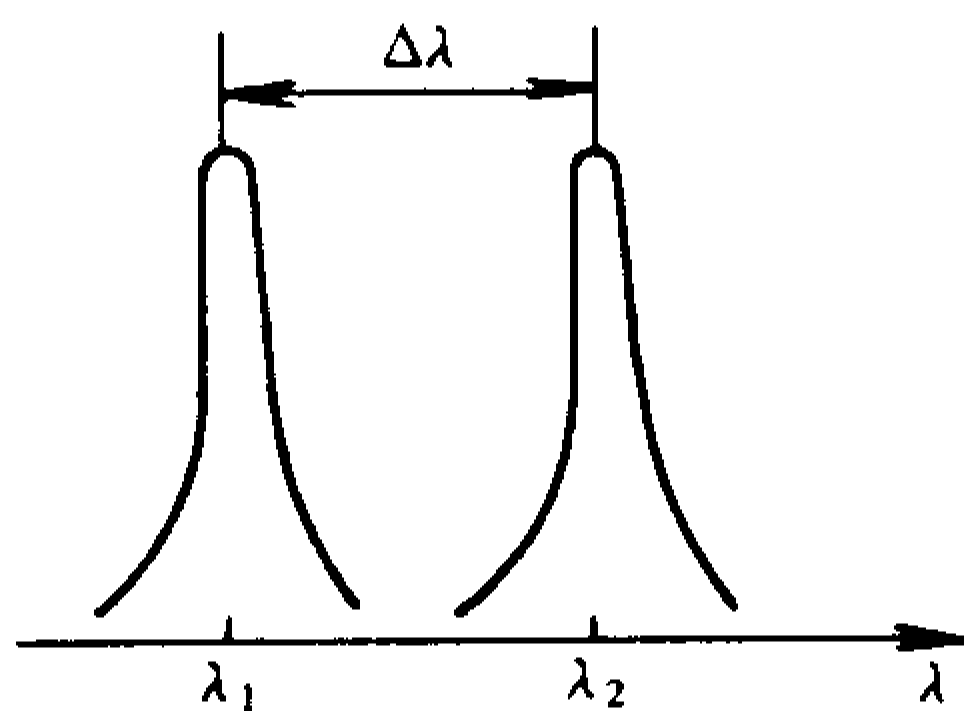


图 14-5

用这种光源照明迈克耳孙干涉仪,它们将各自产生一套干涉图. 干涉场中的强度分布则是两组干涉条纹的非相干叠加,由于 λ_1 和 λ_2 有微小差异,对应 λ_1 的亮环的位置和对应 λ_2 的亮环的位置,将随 d 的变化,而呈周期的重合和错开. 因此 d 变化时,视场中所见叠加后的干涉条纹交替出现"清晰"和"模糊甚至消失".

设在 d 值为d_1 时，λ_1 与 λ_2 均为亮条纹，视见度最佳，则有

$$d_1 = m\frac{\lambda_1}{2},\ d_1 = n\frac{\lambda_2}{2}\ (m \text{ 和 } n \text{ 为整数})$$

如果 $\lambda_1 > \lambda_2$，当 d 值增加到d_2，如果满足

$$d_2 = (m+K)\frac{\lambda_1}{2},\ d_2 = (n+K+0.5)\frac{\lambda_2}{2}(K \text{ 为整数})$$

此时对 λ_1 是亮条纹，对 λ_2 则为暗条纹，视见度最差(可能分不清条纹). 从视见度最佳到最差，M_1 移动距离为

$$d_2 - d_1 = K\frac{\lambda_1}{2} = (K+0.5)\frac{\lambda_2}{2}$$

由 $K\frac{\lambda_1}{2} = (K+0.5)\frac{\lambda_2}{2}$和 $d_2 - d_1 = K\frac{\lambda_1}{2}$消去 K 可得二波长差

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{4(d_2 - d_1)} \approx \frac{\bar{\lambda}_{12}^2}{4(d_2 - d_1)}, \qquad (14-7)$$

式中 $\bar{\lambda}_{12}$为 λ_1、λ_2 的平均值. 因为视见度最差时，M_1 的位置对称地分布在视见度最佳位置的两侧，所以相邻视见度最差的 M_1 移动距离 Δd 与 $\Delta\lambda(=\lambda_1 - \lambda_2)$的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}_{12}^2}{2\Delta d} \qquad (14-8)$$

测量

1. 以钠灯为光源调干涉仪看到等倾干涉条纹.

2. 移动 M_1，使视场中心的视见度最小，记录 M_1 的位置为 d_1，沿原方向继续移动 M_1，直至视见度又为最小，M_1 的位置为 d_2，则 $\Delta d = |d_2 - d_1|$. 由于 λ_1、λ_2 的波长差很小，视见度最差位置附近有较大的范围的视见度都很差，即模糊区很宽，因此确定视见度最差的位置有很大的偶然误差. 在此可以使用粗调手轮用精度 0.01 mm 去测，测出 10 个模糊区的间距去计算 Δd. 这是利用拓展量程去减小单次测量的偶然误差.

复习思考题

1. 分析扩束激光和钠光产生的圆形干涉条纹的差别.

2. 调节钠光的干涉条纹时,如已确使指针的双影重合,但条纹并未出现,试分析可能产生的原因.

3. 如何判断和检验干涉条纹属于严格的等倾条纹?

4. 怎样用实验方法检验干涉条纹的定位区域?

实验十五　法布里－珀罗标准具

目的

1. 了解 F－P 标准具[①]的结构、特点、调节和使用方法；
2. 应用 F－P 标准具测定汞谱线的波长或膜层厚度.

仪器和用具

F－P 标准具，低压汞灯（GP 20 Hg），高压汞灯（GGQ80），钠灯（GP 20 Na），干涉滤光片（$\lambda = 546.1$ nm），移测显微镜，会聚透镜，望远镜.

原理

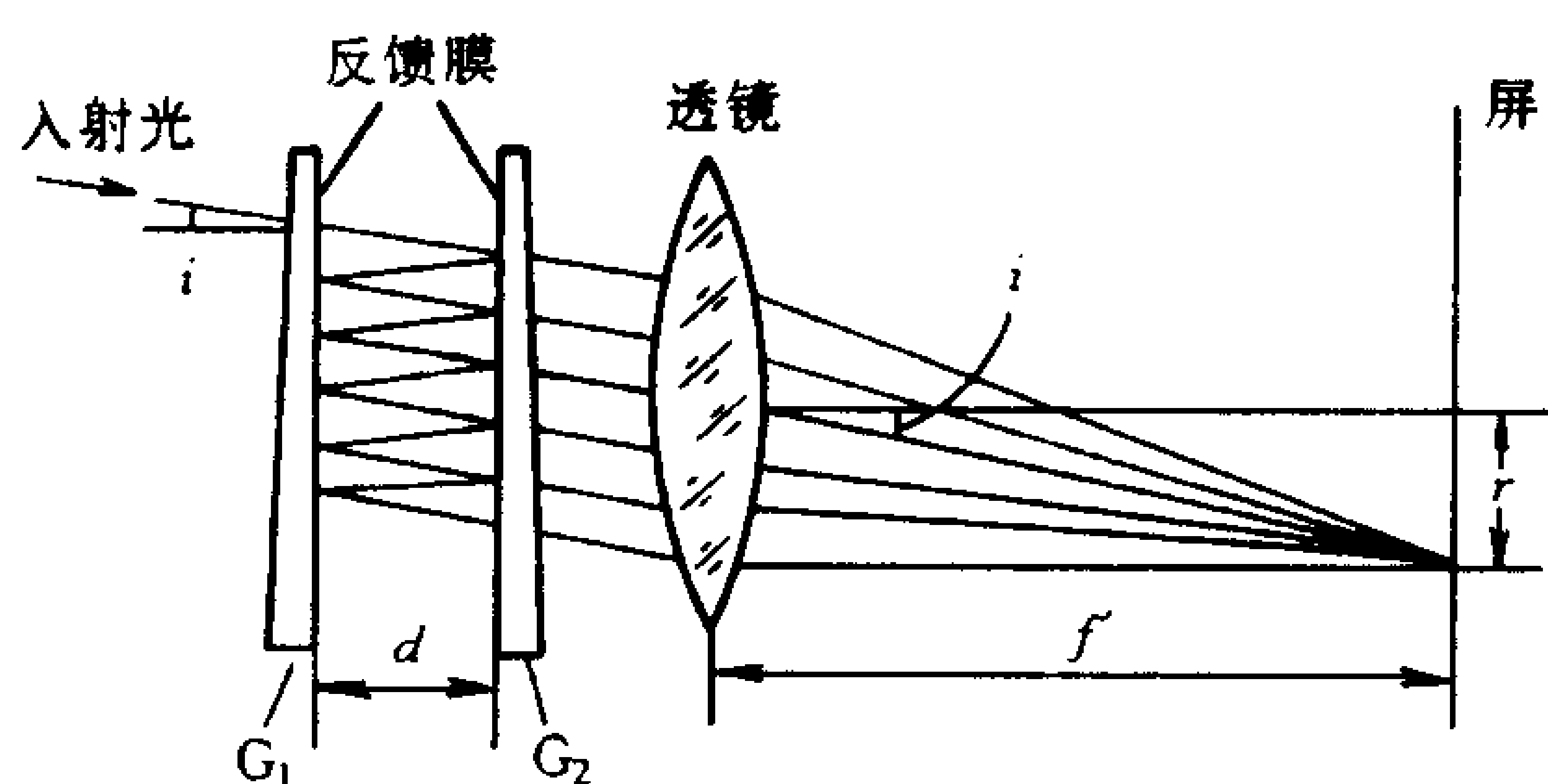
1. F－P 标准具是由两块平面玻璃板 G_1、G_2 组成，两玻璃板的内表面镀以高反射率的银或铝膜，镀膜面的平面度要求很高. 当两表面严格平行时，由于光在这两个镀膜面之间空气层的反复反射，便形成多光束的等倾干涉圆环. 其外形结构和光路分别如图 15－1(a)、(b)所示. 为避免没有涂镀的表面反射光的干扰，两块平板通常做成楔形，楔角约 $1' \sim 10'$. 两块平板均安装在金属框内，其中一块固定，另一块可借三个调节螺钉调整两反射面的平行度及空气层的厚度 d.

2. F－P 标准具需用单色扩展光源照明，其中一束光线的光路如图 15－1(a)所示，若透镜 L 的主轴垂直于镀膜面，在透镜的焦平面上将形成一系列细窄明亮的圆形等倾干涉条纹. 这时相邻的两相干光束的光程差 Δ 为

$$\Delta = 2d\cos i \tag{15-1}$$

---

① F－P 标准具即法布里（Fabry）－珀罗（Perot）标准具的简称.



(a)

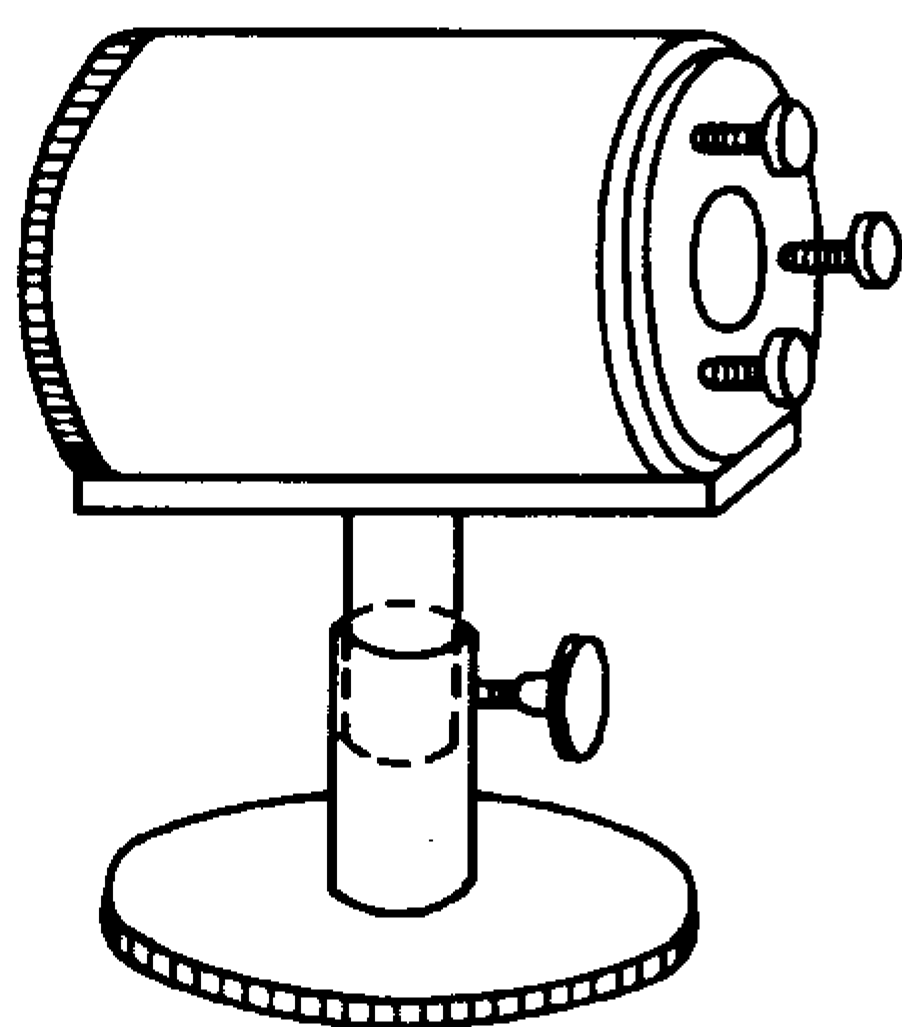

(b)

图 15－1

当 $\Delta = k\lambda$ 时形成第 k 级亮纹，相邻干涉条纹的角距离

$$\Delta i = \frac{\lambda}{2d\sin i} \tag{15-2}$$

计算可知，透过 F－P 标准具的相干光束在 P 点叠加的强度为

$$I = I_0\left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\frac{\delta}{2}\right)^{-1} \tag{15-3}$$

式中 I_0 为入射光强，R 为镀膜层的光强反射率，δ 为两相邻光束在 P 点产生的相差．对不同 R，透射光干涉的相对光强分布曲线如图 15－2 所示．

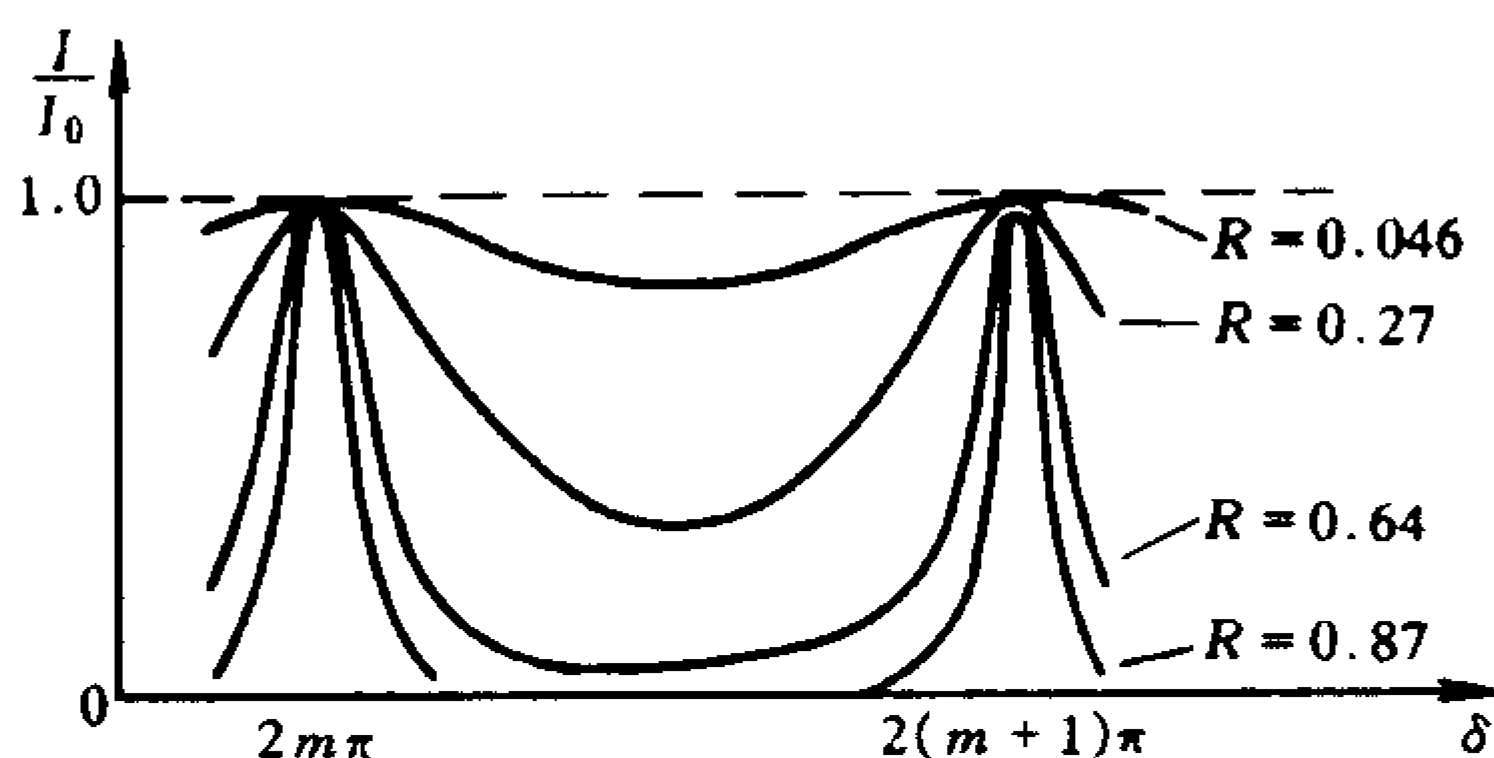


图 15-2

由式(15-1)、(15-2)、(15-3)可知，F-P 标准具产生干涉条纹的分布特点是：(1)视场中心($i=0$)，干涉条纹级次最高，从中心向外，依次为 $k-1,k-2,\cdots$级. (2)相邻干涉条纹的角距 Δi 随 d、i 的增大而减小，即 d 越大时或离中心越远处，干涉环的间隔越小. (3) 特别重要的是，透射光的干涉图是黑暗背景上的亮条纹，且反射率 R 越高，亮条纹就越细锐.

3. F-P 标准具另外两个特点是分辨本领高和自由光谱区小. 按照瑞利分辨判据，不难得出 F-P 标准具在波长 λ 处的分辨率为

$$A=\lambda/\Delta\lambda_{\mathrm{m}}=0.97ks \tag{15-4}$$

式中 $\Delta\lambda_{\mathrm{m}}$ 为能分辨的最小波长差，k 为干涉级，$s=\dfrac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$，称为干涉条纹的精细度. 若令 $N=0.97s$ 为有效光束数，则 $A=kN$ 与光栅的分辨率有相同的表示式，以 $d=5\ \mathrm{mm}$，$R=0.9$ 为例，在 $\lambda=500\ \mathrm{nm}$ 处，F-P 标准具能分辨的最小波长差 $\Delta\lambda_{\mathrm{m}}=0.000\ 83\ \mathrm{nm}$.

若照明光源包含有波长 λ_1 和 λ_2 两种光时，将会发生 λ_2 的 k 级圆纹与 λ_1 的 $k-1$ 级圆纹重叠的现象，由 $k\lambda_2=(k-1)\lambda_1$，可知 $\lambda_1-\lambda_2=\lambda_1/k$，由于 k 数值一般很大，可用视场中心条纹干涉级代替，将 $2d=k\lambda$ 代入，即得

$$\Delta\lambda_R=\lambda_1-\lambda_2=\frac{\bar{\lambda}^2}{2d} \tag{15-5}$$

$\Delta\lambda_R$ 称为不重叠区或自由光谱区，即要求进入标准具的单色光成分要较纯，超过 $\Delta\lambda_R$ 的范围，将会发生干涉级的重叠现象，可见，F－P 标准具只适用于波长差很小的入射光束，仍以 $d=5$ mm，$\lambda=500$ nm 为例，F－P 可测量的波长差 $\Delta\lambda_R$ 仅 0.025 nm，所以实验时必须使用滤光片，以获得单色光的照明.

4. 用 F－P 测量光波的波长和微小波长差. 由图 15－1 知，k 级亮纹产生的条件为 $2d\cos i=k\lambda$，另有关系式

$$\cos i=f'/\sqrt{f'^2+r_k^2}=1-\frac{1}{2}\cdot\frac{r_k^2}{f'^2}.$$

合并两式，即有

$$2d\left(1-\frac{1}{2}\frac{r_k^2}{f'^2}\right)=k\lambda \tag{15-6}$$

式中 f' 为照相物镜的焦距，r_k 为 k 级圆纹的半径，若同一波长相邻两干涉圆纹半径的平方差用 Δr^2 表示，则有

$$\Delta r^2=r_{k-1}^2-r_k^2=\frac{\lambda f'^2}{d} \tag{15-7}$$

可见，Δr^2 是与干涉级 k 无关的常量.

如果测得从中心数起的两亮纹的半径 r_{m_1} 和 r_{m_2}，由(15－6)式可得

$$\begin{cases} d=\lambda f'^2(m_2-m_1)(r_{m_1}^2-r_{m_2}^2)^{-1} \\ \text{或}\ \lambda=d(r_{m_1}^2-r_{m_2}^2)[f'^2(m_2-m_1)]^{-1} \end{cases} \tag{15-8}$$

因此，只要量出干涉环的半径，即可应用式(15－8)求出照明光波波长 λ（d，f' 已知），或膜厚 d（λ，f' 已知）.

实验内容

1. F－P 标准具的调节. 按照图 15－3 装置调节光路，点亮汞

灯 S,应用透镜 L_1 使照明光束充满 F－P 的孔径,这时观察者不用移测显微镜 M 和成像透镜 L_2,便可直接看见干涉圆纹,让环纹的中心位于标准具视场的中央,上、下、左、右移动眼睛观察干涉条纹的变化. 如看见视场中心有条纹不断“涌出”或“陷入”,则可使用标准具上三个调节螺钉,进行调节,直至干涉环纹的大小均稳定不变,仅环纹中心的位置随观察者视线的移动而变化为止.

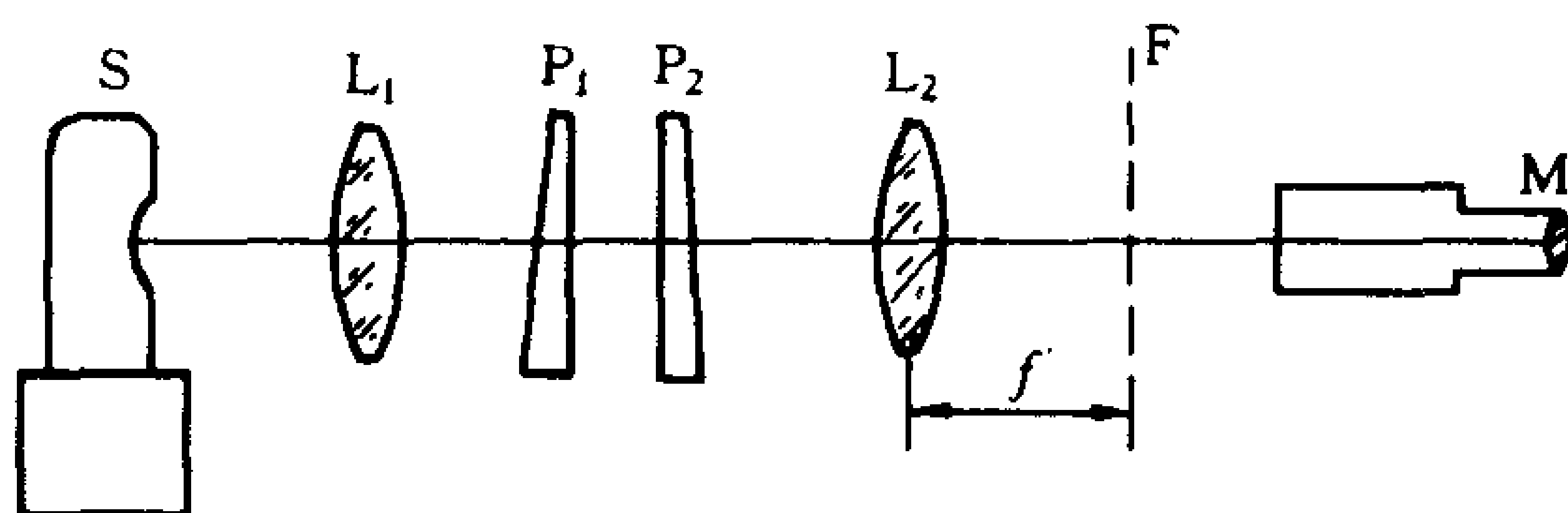


图 15－3

2. 观察多光束等倾干涉条纹

标准具调节完成后,放上对无穷远调焦好的望远镜,加上干涉滤光片(例如 546.1 nm),应能看到准单色光产生的等倾干涉圆环,并与迈克耳孙干涉仪产生的双光束等倾干涉圆级比较,说明异同.

3. 测定干涉圆纹半径 r_k

(1) 移去望远镜,在标准具与移测显微镜之间加入消色差透镜 L_2,令移测显微镜对 L_2 后焦面聚焦,应能从中看到一组清晰的干涉条纹.

(2) 用移测显微镜测出近中心处 10 个干涉圆环的直径. 测量时应将显微镜的垂直叉丝调节与显微镜筒移动方向相垂直,并分别与各干涉环纹的两边相切,记录相切时的位置读数,重复几次,取平均值.

(3) 算出各个相邻条纹的 $\Delta r_k^2 = r_{k-1}^2 - r_k^2$,与式(15－7)进行比较,并说明结果. 用逐差法处理所得数据,计算 $\Delta \bar{r}_k^2$.

4. 测定光波波长 λ 或膜厚 d

将 $\Delta \bar{r}_k^2$ 或$(r_{k-5}^2 - r_k^2)/5$ 之值代入式(15－6)计算膜厚 d,并计算不确定度. 实验中取 $\lambda = 546.07$ nm,透镜焦距 f' 的数值由实验室提供.

5. 将 GP 20 Hg 灯分别换成 GP 20 Na 灯和 GGQ80 汞灯照明,观察、记录干涉条纹的变化,(1)钠黄双线有无分开,干涉条纹有无重叠? (2)高压汞灯照明,干涉圆环逐渐消失. 试分析说明之.

注意事项

1. F－P标准具和迈克耳孙干涉仪一样,是很精密的光学仪器,使用时,不能触摸元件光学面,调节动作要平稳缓慢,不可面对仪器说话,也要注意防尘、防震和防潮.

2. 使用移测显微镜不要忘记防止回程误差,测量叉丝和干涉图要严格共面.

3. 在F－P标准具中,观察单色光产生的干涉条纹时,如前所述条纹的锐细程度主要决定于标准具中镀膜面的反射率 R, R 越大,条纹越锐细. 实际上每一条波长为 λ 的单色谱线均有一定的轮廓和宽度,以汞蒸气放电灯为例,其绿光谱线的轮廓如图 15－4 所示. 温度越高,气压越高,因发光原子之间的“碰撞”加剧以及多普勒效应等因素将导致谱线的宽度 $\delta\lambda$ 增大,即相干长度变短,单色性变坏. 如用以照明 F－P 标准具,则干涉圆纹亦将变宽. 由于 F－P 标准具的自由光谱区很窄,干涉条纹甚至会趋于消失,故本实验宜选用低压汞灯.

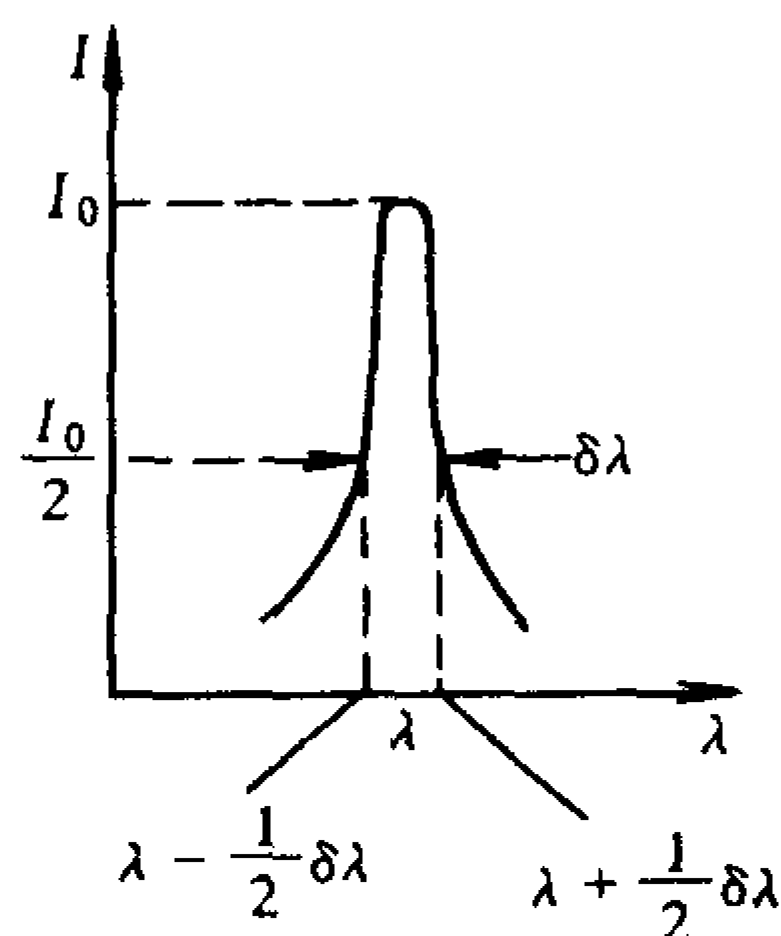


图 15－4

复习思考题

1. 当人眼自上而下移动时,若发现有条纹从视场中心不断“涌出”,试分析标准具中空气膜层厚度的分布情况,怎样调节才能使条纹稳定不变?

2. 如果移测显微镜视场里的干涉环纹不能同时清晰,这是什么原因造成的?

3. 怎样应用 F-P 标准具,才可以测定 He-Ne 激光的波长?

4. 怎样才能应用 F-P 标准具测定在下列不同情形时双线的波长差?

(1) 不发生干涉级的重叠.

(2) 有干涉级的交叠现象.

分别说明实验原理和方法.

实验十六　感光乳胶的特性曲线

目的

1. 了解照相底片的性能；
2. 制作感光乳胶特性曲线；
3. 应用特性曲线测定 He－Ne 激光光谱的相对光强分布.

仪器和用具

汞灯，干涉滤光片(546.1 nm)，阶梯扇形板，照相机，黑度计，毛玻璃.

原理

照相底片是一种记录光强、储存光信号的重要记录介质，广泛应用于图像摄影、航天遥测、光谱分析和全息照相等各个领域. 照相底片就是将感光乳胶均匀涂布在透明片基上，而感光乳胶则是由悬浮在明胶中的卤化银(主要为溴化银)和光谱增感剂所组成. 实际结构如图 16－1 所示.

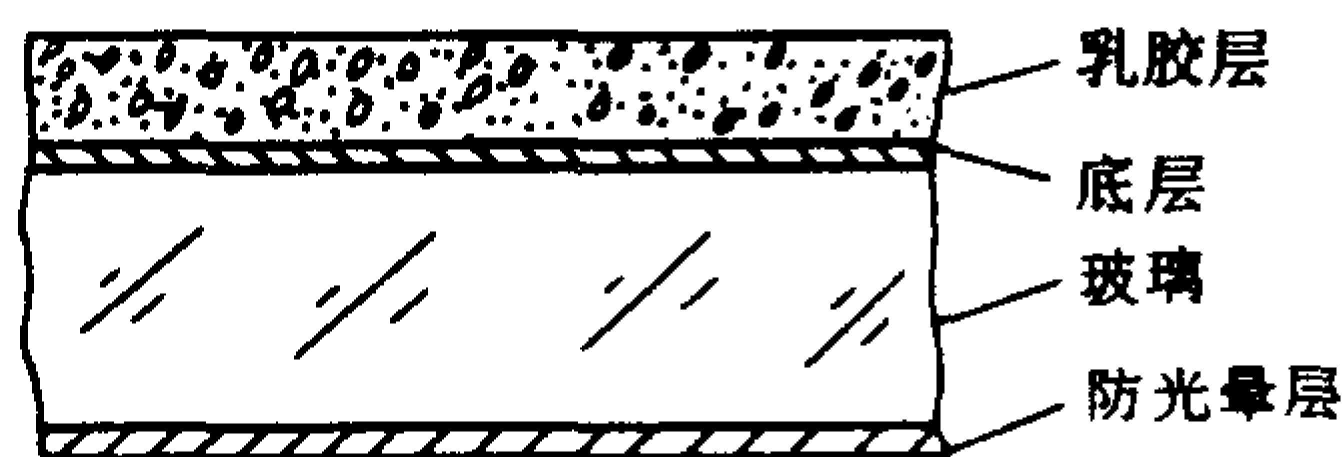


图 16－1

用照相底片记录物理实验的信息，可供进一步作定性和定量分析. 在定量分析底片时，主要是要从底片上的黑度去了解实际光强的情况. 影响底片黑度有哪些因素？黑度与光强的关系如何？这是利用照相底片记录和分析实验信息时，必须研究的问题.

一、感光乳胶的特性曲线

从乳胶感光过程的讨论(附记 1)可知,照相底片上单位面积光照能量越大的地方,通过显影,还原的银原子的密度就越大,因而该处光透过率就越小,底片显得越黑. 在感光乳胶的种类、光波波长和显影条件一定时,显影后,底片变黑的程度与单位面积接受的光能即曝光量 H 有关,曝光量 H 的定义为

$$H = E \cdot t \tag{16-1}$$

式中 E 为照度,单位为勒克斯(符号为 lx),t 为曝光时间. 曝光量的单位为勒克斯秒(符号为 lx·s),简称勒秒. 由于底片的变黑,当强度为 I_0 的入射光照射在底片上的 (x,y) 处,其透射光强 $I(x,y)$ 将小于 $I_0(x,y)$,则光强透过率 $T(x,y)$ 为

$$T(x,y) = \frac{I(x,y)}{I_0(x,y)} \tag{16-2}$$

F. Hurter 和 V. G. Driffield 曾证明 $\lg\left(\frac{1}{T}\right)$ 与底片上单位面积的含银量成正比,于是底片的黑度(亦称光密度)D 可由下式定义:

$$D = \lg\left(\frac{1}{T}\right) \tag{16-3}$$

它是对底片变黑程度的定量描述. 曝光量 H 的对数与乳胶的黑度 D 之间有着简单的依赖关系,故称 $D-\lg H$ 图线为感光乳胶特性曲线(亦称 $H-D$ 曲线),用以描述它的感光性能. 为了正确地使用感光底片,必须在使用前制作感光乳胶的特性曲线,从而得到感光底片的有关参量,如反差系数,宽容度等,为使用选择合适的感光片和确定工作条件提供依据.

典型的 $H-D$ 曲线如图 16-2 所示,可分为四个部分:

1. 曝光不足部分,即曲线 AB 段.

在此区域内黑度随曝光量的增长缓慢,景物上照度的差别在底片上得不到足够的反映. 底片未经曝光而产生的黑度 D_0 称为

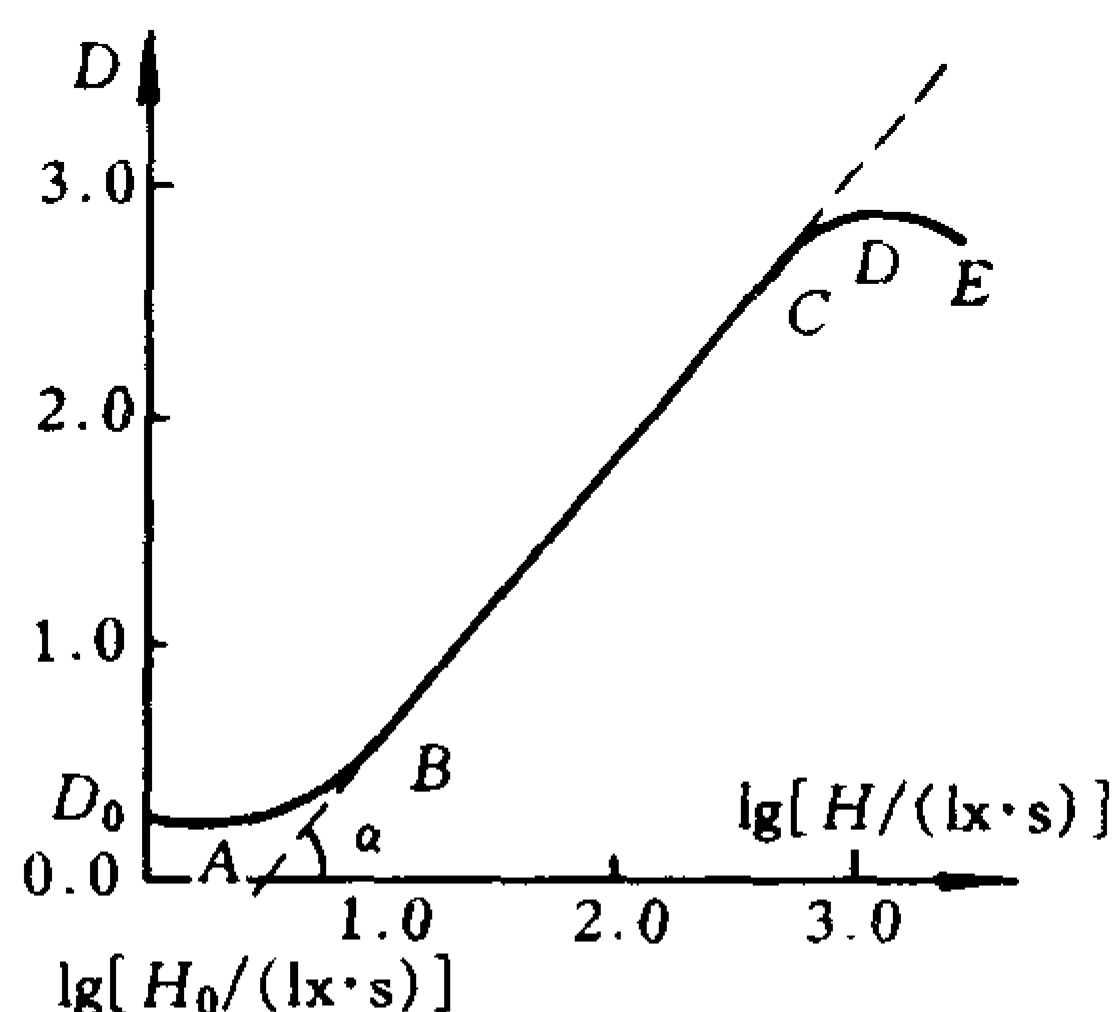


图 16－2

灰雾度，它应越小越好，过大的灰雾度将影响所记录物像的层次和清晰度(简称反差或反衬度).

2. 曝光正常部分，即 $H-D$ 曲线上的直线部分(BC 段)，是测量时应用的重要部分.

在此范围内，底片的黑度与曝光量对数呈线性关系，数学上可表示为

$$D=\gamma(\lg H-\lg H_0) \tag{16-4}$$

式中 γ 为直线部分的斜率，即

$$\gamma=\operatorname{tg}\alpha \tag{16-5}$$

γ 称为反差系数，是照相感光底片的重要参量之一，表示曝光量改变时黑度改变的快慢. γ 值大的称为高反差感光片，γ 值小的称为低反差感光片，底片反差过大，拍摄的影像缺乏层次，反差过小则影像黑白不分明，因而需要根据不同的用途选择底片. 例如拍摄文字、图像宜选用高反差(较硬)的底片，以提高对比度，而拍摄多层次的立体景物，则应选用低反差(较软)的底片，以增加柔和感.

直线 BC 在横坐标上的投影 L 称为底片的宽容度，有

$$L=\lg H_C-\lg H_B=\lg\frac{H_C}{H_B} \tag{16-6}$$

宽容度 L 的大小标志着感光底片记录光线强弱等级的能力范围.

例如被摄景物上最亮与最暗部分的强度相差100倍，则应选用宽容度为2的感光底片．一般说来，选用宽容度大的感光底片，容易取得较好的拍摄效果，即尽量选择底片的曝光量在标定的宽容度范围内变动．

3．曝光过度部分，即曲线 CD 段．

在此区域，底片黑度很大，且当曝光量增加时，黑度变化很小，不适合用作光强的测量工作．

4．反转部分，即曲线 DE 段．感光特性曲线的斜率为负值．即黑度随曝光量对数的增加反而逐渐减小．这一区域没有什么实用意义．

二、$|t|-H$ 特性曲线

在全息照相和相干光信息处理实验中，并不需要知道感光底片的光强透过率 T 和曝光量之间的关系，而是需要将曝光时的入射光强转化为显影后感光片透过率的复振幅，因此常须制作底片的振幅透过率和曝光量之间的特性关系曲线．

复振幅透过率 $|t|$ 为透射光的复振幅与入射光复振幅之比，即

$$|t| = U_{透}/U_{入} \qquad (16-7)$$

由于光强 $I=|U|^2$，所以在不考虑相位变化时，可以近似写成

$$|t| = \sqrt{T} \qquad (16-8)$$

因此，以曝光量 H 为横坐标，以 $|t|$ 为纵坐标，即可制作感光底片的 $|t|-H$ 特性曲线，如图16－3所示．全息照相及光信息处理实验中，感光底片的工作区应选在特性曲线的直线部分，其斜率 β 为负值．

实验内容

一、制作感光乳胶特性曲线（$D-\lg H$ 曲线）

要制作特性曲线，必须有获得不同的曝光量的装置．为此，实

验室常用的有阶梯扇板、阶梯减光板和偏振片等，本实验采用阶梯扇板.

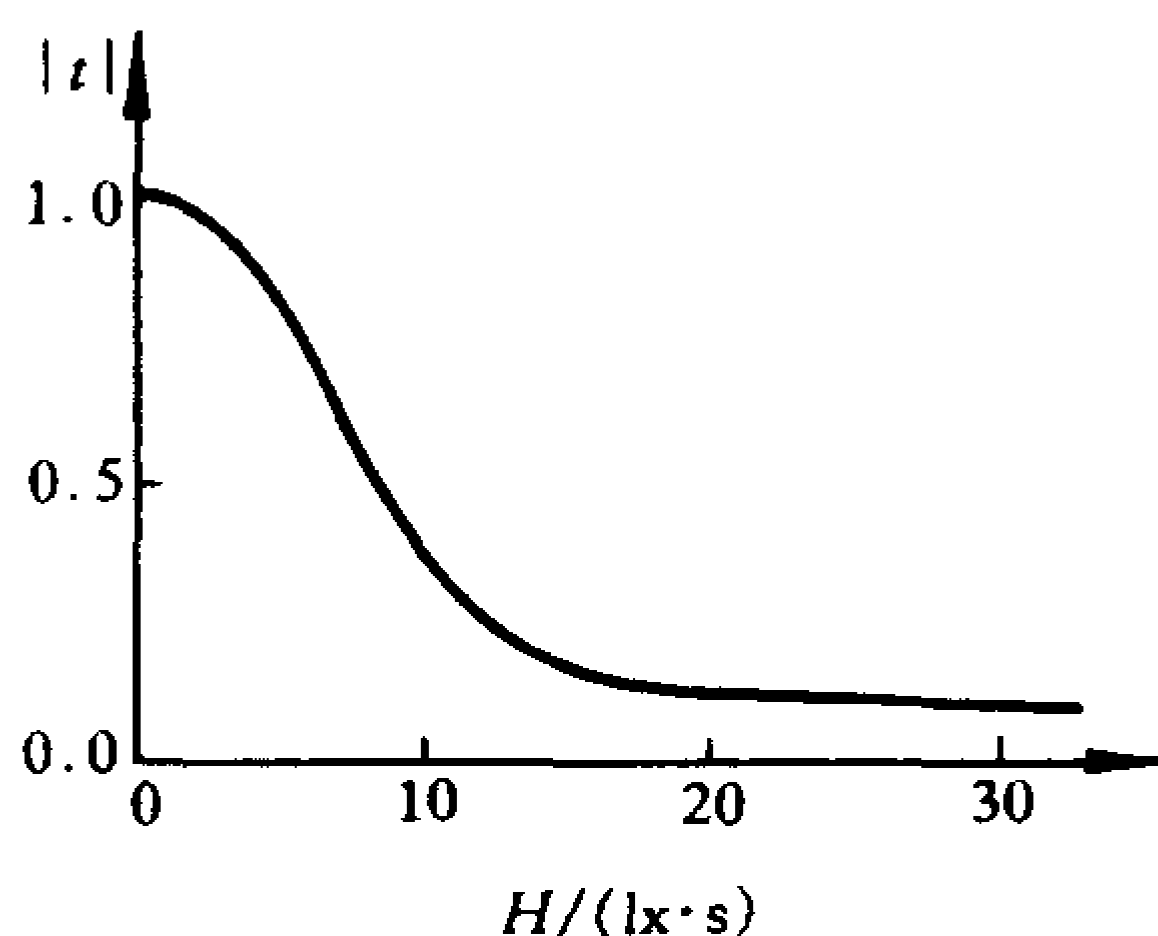


图 16－3

1. 实验光路如图 16－4 所示，用汞灯通过滤光片、毛玻璃均匀照射一块阶梯扇板，用照相机对阶梯扇板调焦，使清晰的扇形板成像在照相机暗盒的毛玻璃上.

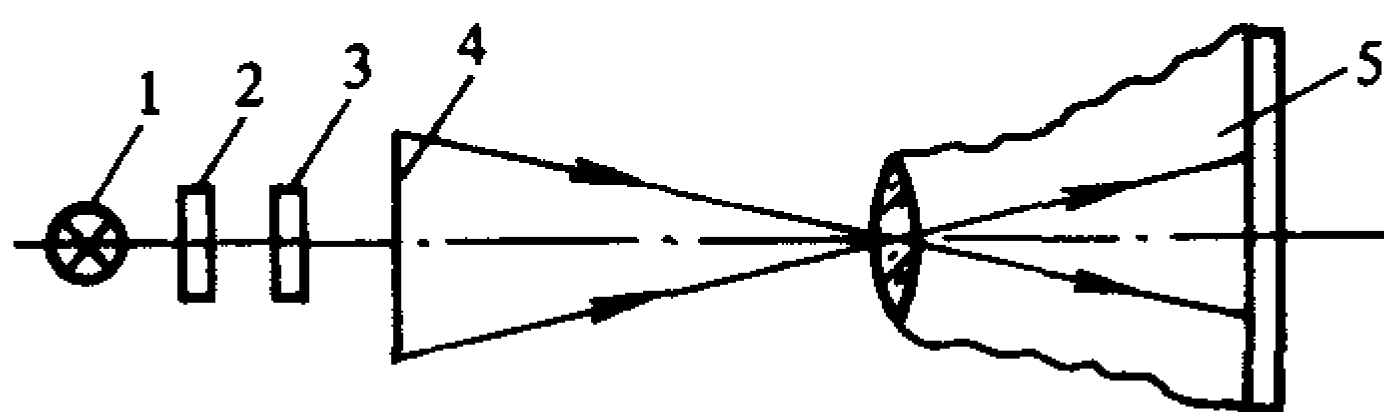


图 16－4

1. 汞灯；2. 干涉滤光片 546.1 nm；3. 毛玻璃；
4. 阶梯扇板；5. 照相机

阶梯扇板是一块金属圆板，上面开有许多同心的扇形孔，每一孔的弧长由外向内以 2 的倍数递增. 如图 16－5 所示，扇形开孔共有 11 圈，即有 11 个曝光阶梯. 扇形圆板由电机拖动，能快速、平稳地绕其中心轴旋转. 由于照明扇形板的光强分布均匀（为常数），所以各扇形阶梯的相应像面的曝光时间（或曝光量）亦将以 2 的倍数递增，实际曝光时间 t 与最小曝光时间 t_0 的相对比值为

1:2:4:8…. t_0 由阶梯扇形的转速确定. 则 t/t_0 和 H 成比例.

2. 将照相机暗盒毛玻璃换上待测底片,按实验室提供的条件进行曝光.

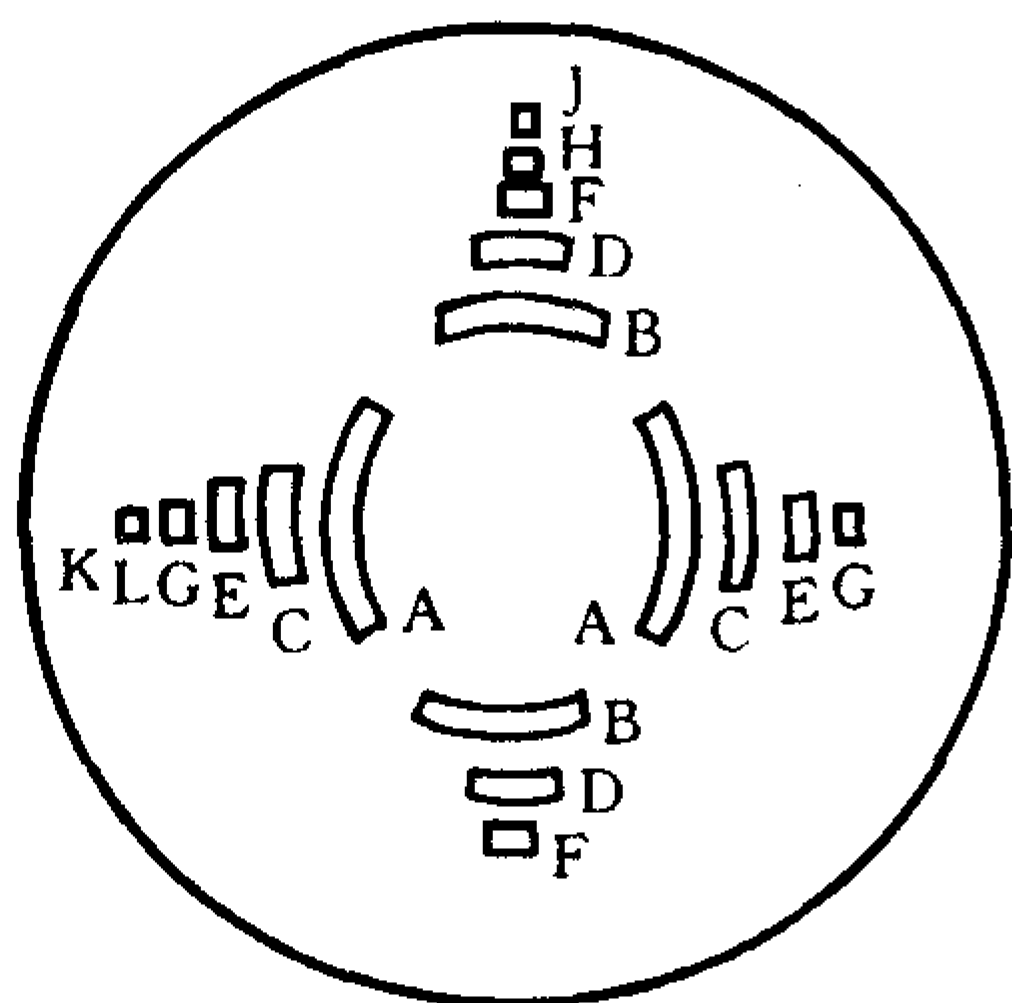


图 16-5

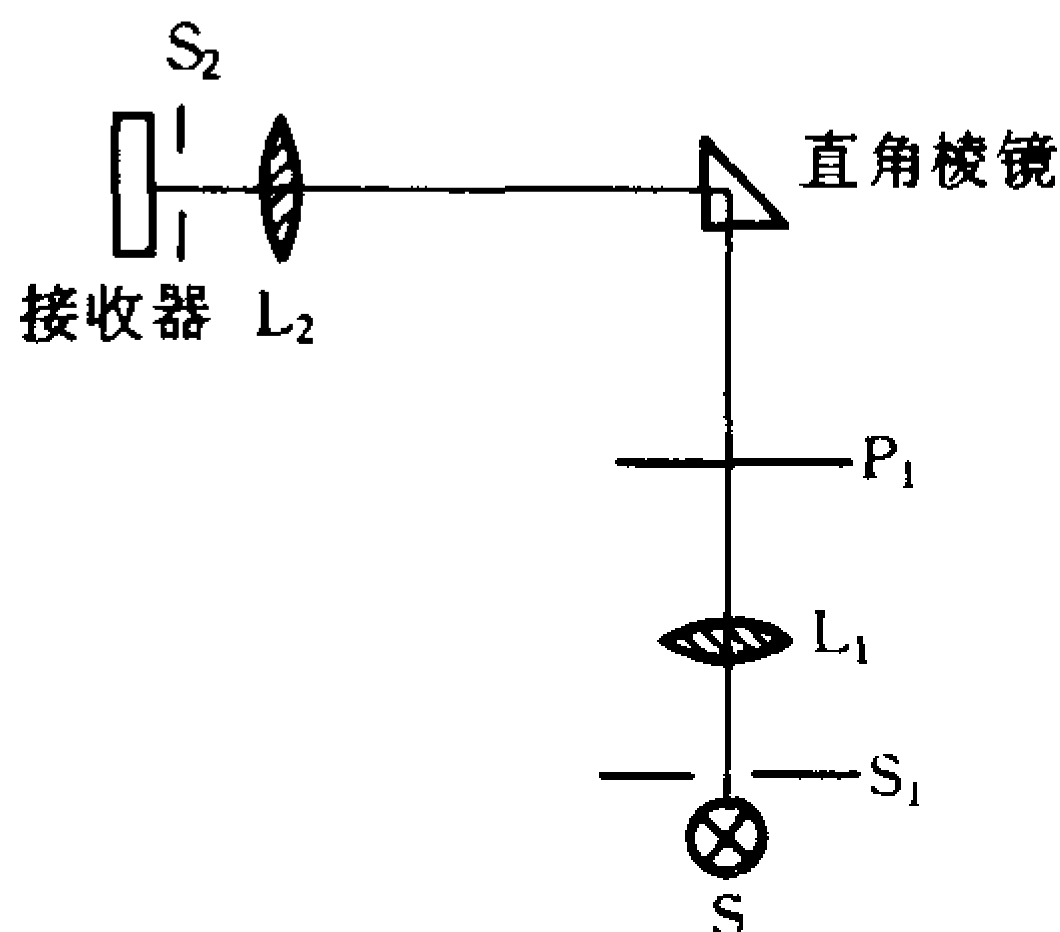


图 16-6

3. 对底片进行显影、定影和晾干处理,同时记录有关的实验条件(显影液型号、显影时间及显影温度).

4. 用学生型黑度计测量扇形阶梯像上的黑度分布.

学生型黑度计的光路如图 16-6 所示,光源 S 为 30 W 的白炽灯,狭缝 S_1 被照明后,经透镜 L_1 在待测感光片 P_1 上形成狭缝的像,P_1 可借平台上的调节螺丝左右平移,从而使入射光束能依次透过底片上不同黑度的扇形阶梯像. 透过底片的光线再经直角棱镜和透镜 L_2 后,在光电接受器前的狭缝 S_2 上重新形成狭缝的像,接受器前的狭缝可前后移动,使缝像清晰. 若光电池工作在线性区,且用灵敏电流计显示光强,则灵敏电流计的偏转格值 d 正比于光强,故式(16-3)可改写成

$$D=\lg\frac{I_0}{I}=\lg\frac{d_0}{d} \tag{16-9}$$

式中 I_0,d_0 为光线通过感光底片未曝光部分的光强和电流计相应的偏转格值,I,d 则为光线透过某一扇形阶梯像的透射光强和

电流计偏转格值. 测量要重复几次.

5. 以 $\lg\frac{t}{t_0}$为横坐标,按式(16-9)求得的 D 为纵坐标,作出待测感光底片的特性曲线,并从曲线上确定感光片的特性参量值,即反差系数 γ、灰雾度 D_0 和宽容度 L.

6. 选用不同型号的感光底片,改换实验条件(不同的显影液型号和不同的显影时间),作出多组感光特性曲线,进行分析、比较.

7. 选用Ⅰ型全息干板,用同样方法测定全息感光片的 $|t|-H$特性曲线.

复习思考题

1. 实验测得的 $D-\lg\frac{t}{t_0}$曲线与 $D-\lg H$ 曲线有什么关系? 在下述哪些条件下所测得的 $D-\lg\frac{t}{t_0}$曲线能正确代表 $D-H$ 曲线,为什么?

(1) 照射扇板上的光强为(a)周期性变化,(b)恒定不变.

(2) 在曝光时间内,扇板转数的数量级为(a)10^2/s,(b)10/s.

2. 若扇板的旋转周期小于或近于拍摄扇板像的曝光时间,能否制作出正确的特性曲线,为什么?

3. 能否设计一实验方案用来测定 H 的实际数值?

[附记]

[1] 溴化银乳胶的感光过程

溴化银乳胶在光照以后,发生复杂的光化学反应,分解出金属银离子 Ag^+ 和溴离子 Br^-. 溴离子吸收光子将能量供给自由电子,即



$$Br^- + h\nu \rightarrow Br + e^-$$

自由电子再被银离子俘获、中和构成原子,亦即

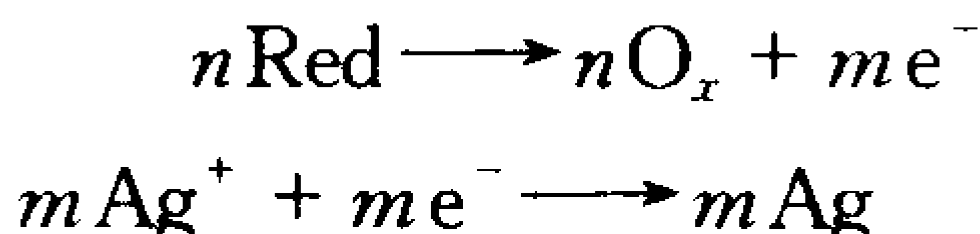


$$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$$

这样析出的金属银微粒散布在乳胶中,形成潜影中心. 银粒子的密度实际上是很小的,人眼观察不到对光的吸收作用. 通过显影

过程，由于显影液中还原剂的作用，上述光照处析出的银起着加速还原的催化作用，使潜影中心附近的大量溴化银还原为金属银沉积在底片上，而不在潜影中心的溴化银不产生这种变化，最后在定影过程中被完全滤去．随着银离子密度不同，对光的吸收也不同，于是产生了可见的影像．

显影过程的化学反应式为

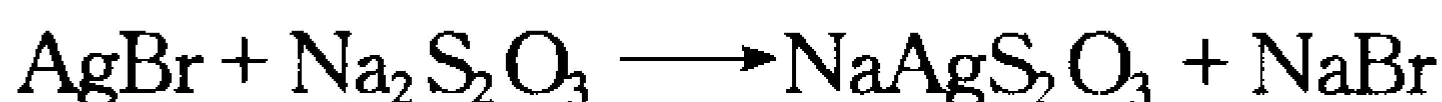


$$n\mathrm{Red} \longrightarrow n\mathrm{O}_x + m\mathrm{e}^-$$

$$m\mathrm{Ag}^+ + m\mathrm{e}^- \longrightarrow m\mathrm{Ag}$$

式中 Red 为还原剂，是显影液中的主要成分．O_x 为氧化产物，n 和 m 均为整数．m 等于 n 的整数倍．

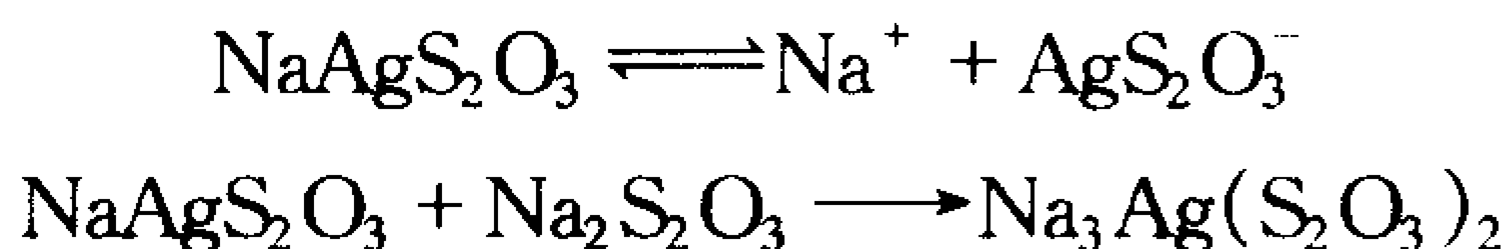
定影过程是利用定影液中的大苏打（硫代硫酸钠）对溴化银的溶解作用．将未曝光部分和曝光部分残留的溴化银清除．第一步反应是生成不溶于水的硫代硫酸银钠，反应式为



$$\mathrm{AgBr} + \mathrm{Na_2S_2O_3} \longrightarrow \mathrm{NaAgS_2O_3} + \mathrm{NaBr}$$

此时乳胶层呈现透明．

硫代硫酸银钠以络离子的形式存在，含银的络离子从乳胶层内向外扩散到溶液中，与硫代硫酸钠连续反应，形成可溶于水的硫代硫酸一银三钠，反应式为



$$\mathrm{NaAgS_2O_3} \rightleftharpoons \mathrm{Na}^+ + \mathrm{AgS_2O_3^-}$$

$$\mathrm{NaAgS_2O_3} + \mathrm{Na_2S_2O_3} \longrightarrow \mathrm{Na_3Ag(S_2O_3)_2}$$

只有当 AgBr 和 $NaAgS_2O_3$ 完全转变为可溶于水的 $Na_3Ag(S_2O_3)_2$（或 $Na_3Ag_3(S_2O_3)_4$）时，定影才告完成．如果底片上残存有 AgBr，则见光后会析出银；如残存 $NaAgS_2O_3$，时间一长，会分解生成硫化银，在乳胶层中留下无法消除的棕黄色痕迹．

[2] 照相底片的光谱特性

照相底片作为一种光探测器和其它探测器一样，也有光谱选择性．没有加光谱增感剂的照相底片，感光的波长范围为 330～480 nm．称为色盲片（无色片）；加了能吸收黄绿光的光谱增

感剂(染料)以后,感光的波长范围扩大为 330～600 nm,因能感受黄绿色光,而称之为正色片,由于正色片对深红色光不敏感,它的显影、定影可以在红色安全灯下进行;如感光乳胶中再加入能吸收红光的光谱增感剂,则对可见光谱中各种波长的光都能感受,即感光的范围为 330～700 nm,称之为全色片.

[3] 感光度

无色片、正色片和全色片对不同波长的感光灵敏度是不一样的. 感光灵敏度就是指感光底片接受光照作用以后,产生光化学反应的灵敏程度(俗称感光速度),灵敏度高的底片只需较弱的光线就能使底片感光. 普通照相底片的灵敏度用感光度表示. 我国暂行的标准制(GB 制)用度作单位,与德国工业标准制(DIN 制)相同,与美国标准制(ASA 制)不同. GB 制和 DIN 制都是每相差 3 度,感光度相差一倍. 三种感光度的对应关系列于表 16－1.

底片感光度的高低与感光乳胶中卤化银的晶粒的直径有关,普通溴化银的晶粒直径约为零点几微米到几个微米之间,直径越小,颗粒越细,感光度越低. 但是颗粒越细底片的分辨率越高,所以全息照相用的底片,因需有较高的分辨率,溴化银颗粒极细,比普通照相感光乳胶小 1～2 数量级,分辨率可达 3000 条线/mm,但感光度相对较低.

[4] 照相底片的累积作用

从式(16－1)可见,底片的曝光量 H 是入射在底片上单位面积的光照能量,可以通过改变光强 I 或曝光时间 t 来调节. 一般地说,只要曝光量 H 相同,不管是 I 大、t 小,或 I 小、t 大,在底片上产生的黑度均相同,这一关系称为倒易定律. 应用倒易定律,可以对弱光(I 小)信号采用较长的曝光时间去记录,照相底片具有的这种“累积作用”是其它探测器所没有的,在弱光信号测量中有其独特的优点. 同样对强光则可以缩短曝光时间去测量. 当倒易律成立时,底片黑度只与曝光量有关,但要注意在测量强闪光或频率较高(大于 1 000 Hz)的脉冲光时,倒易律失效.

表 16-1 照相乳胶的感光度

GB	DIN	ASA
7°	7°	4
8°	8°	5
9°	9°	6
10°	10°	8
11°	11°	10
12°	12°	12
13°	13°	16
14°	14°	20
15°	15°	25
16°	16°	32
17°	17°	40
18°	18°	50
19°	19°	64
20°	20°	80
21°	21°	100
22°	22°	125
23°	23°	160
24°	24°	200
25°	25°	250
26°	26°	320
27°	27°	400
28°	28°	500
29°	29°	650
30°	30°	800
31°	31°	1000

[5] 显像条件对特性曲线的影响

由于照相底片曝光显影后，底片的黑度除直接决定于感光乳胶的性质外，还与多种实验条件有关系，如显影液的成分、浓度、显影温度和显影时间等，因此当应用乳胶特性曲线准确测量光信号

的强度及其分布时，必须在记录待测光信号的同一张底片上，同时制作感光乳胶的特性曲线，以保证二者有完全相同的实验条件，否则测量将会得到谬误的结果.

改变显影时间，制作的特性曲线也不相同，如图 16－7 所示，从图上曲线可以看出，底片的黑度随显影时间的延长而增加，同时，底片的反差系数 γ 也随显影时间增加而增大，但到达最大值后又下降. 提高显影液温度，显影速度会明显加快，若温度过高，显影太快，难以控制，则成像的粒度太粗，温度过低，则费时太久，所以一般显影温度宜控制在 18～20 ℃的范围内，准确的实验过程通常采用恒温装置，使温度变化小于 ±0.5 ℃.

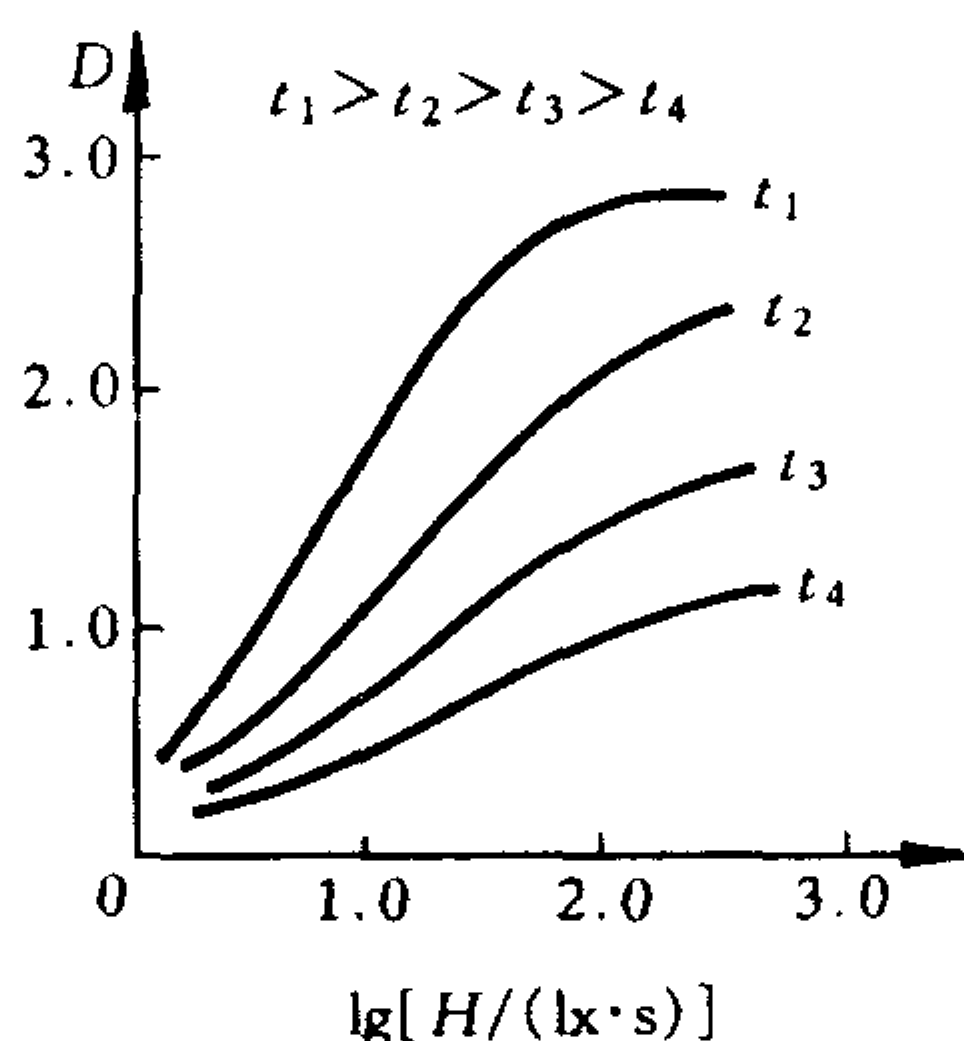


图 16－7

显影液成分不同，会极大地影响特性曲线的分布，例如曝光不足和曝光正常区域的大小、显影的速度、反差和灰雾度.

实验十七　薄膜介质折射率的测定

目的

1. 加深对布儒斯特定律意义的理解；
2. 学会一种测定薄膜介质折射率的方法.

仪器和用具

钠光灯,分光计,偏振片,测微目镜,成像透镜,辅助平面镜,待测膜层样品.

原理

折射率是光学材料的重要参数之一,在实验三和实验四中,我们已学习了透明固体和液体折射率的测定方法,在此实验中学习测量蒸镀在基片上膜层的折射率,这对于光学薄膜的研制是很重要的. 现在介绍一种应用布儒斯特定律测定薄膜折射率的方法.

当一束波长为 λ 的平面偏振光从空气入射到折射率为 n 的介质表面上,如果平面偏振光的偏振面平行于入射面(简称 TM 波),光线的入射角为布儒斯特角 i_B,这时入射的平面偏振光在界面上将不反射而全部进入介质内. 根据布儒斯特定律,入射角 i_B 的正切等于介质折射率 n(对应波长 λ),即

$$\operatorname{tg} i_B = n \tag{17-1}$$

因此,若改变 TM 波的入射角,当反射光强为零时,即可确定布儒斯特入射角 i_B,由式(17-1)求得介质的折射率 n. 这种方法虽然简便,但精度较低,而应用这种方法测量膜层介质的折射率时,还将遇到新的困难. 这是由于 TM 波在薄膜表面虽不发生反射,但在薄膜和基片的界面上仍有反射光透过膜层而折回空气,透射光干扰了对 i_B 的准确测定.

如果在一块平面玻璃基片上，局部区域镀上待测介质膜，如图17－1所示，当用TM波照明时，迎着反射光观察玻璃基片的表面，由于膜层和玻璃表面的反射系数不同，故能看见镀膜区与非镀膜区界线分明．当光线的入射角等于布儒斯特角 i_B 时，如图17－2所示，TM波在薄膜前表面虽然没有反射光，但是进入膜层的光可在膜层后表面反射回来．根据菲涅耳公式，膜层与玻璃上的振幅反射系数 r_p 为



图17－1

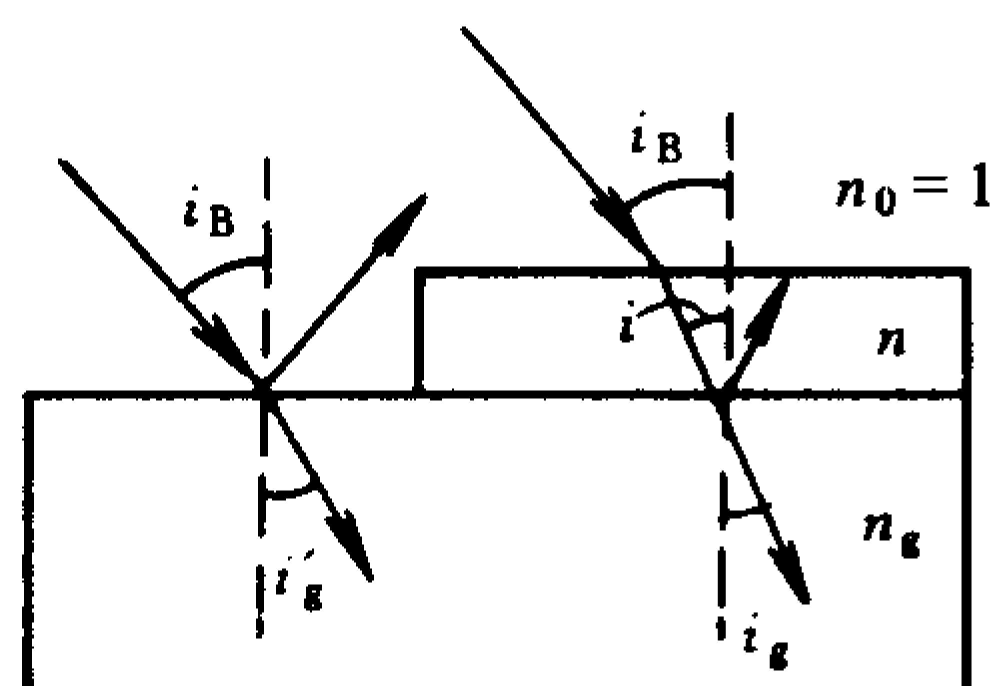


图17－2

$$r_p=\frac{n_g\cos i-n\cos i_g}{n_g\cos i+n\cos i_g} \tag{17-2}$$

式中 n_g 为基片玻璃折射率，i 为光线从介质膜射向基片的入射角，i_g 为在基片中的折射角．当射入介质膜光线的入射角为 i_B 时，应用 $i+i_B=\frac{\pi}{2}$ 和折射定律 $\sin i_B=n\sin i$，可得 $\cos i=\sin i_B$，$\sin i=\cos i_B$，代入式(17－2)，则有

$$r_p=\frac{n_g\cos i_B-\cos i_g}{n_g\cos i_B+\cos i_g} \tag{17-3}$$

而TM波在空气－玻璃界面的反射系数 r'_p 为

$$r'_p=\frac{n_g\cos i_B-\cos i'_g}{n_g\cos i_B+\cos i'_g} \tag{17-4}$$

由镀膜区与非镀膜区的折射定律 $\sin i_B=n_g\sin i'_g$ 和 $n_g\sin i_g=n\sin i=\sin i_B$，直接得到

$$i_g = i'_g$$

比较式(17－3)和式(17－4),显然

$$r_p = r'_p \qquad (17-5)$$

上式说明,当 TM 波以布儒斯特角入射样品表面时,迎着反射光观察玻璃基片的表面,因镀膜区与非镀膜区的反射光强相等,明暗界线将消失,呈现一片均匀照明. 尽管人眼视觉不能定量地确定光强的数值,但却能相当准确地判断两束光的强度是否相等. 因而当眼睛观察到待测样品的视场呈现均匀照明,镀膜区与非镀膜区之间界线消失时,则此时光波的入射角必为布儒斯特角 i_B,应用式(17－1)即可较准确地求得膜层介质的折射率.

(问:为什么反射系数相等,镀膜区与非镀膜区的反射光强就相等呢?)

实验内容

1. 利用辅助平面镜,根据自准直原理调整望远镜 T,使之垂直于分光计转轴(具体调整方法参见实验三).

2. 点亮钠灯 S,用钠光照明准直管 C,使准直管发出平行光束. 再调整其光轴,使与望远镜共轴,并垂直于分光计转轴.

3. 将镀膜样品 F 的背面涂黑,以减少样品反射光的干扰. 然后,如图17－3,将样品垂直放置在分光计的载物平台上. 用调整好的望远镜对准待测样品的表面,使之位于与分光计转轴平行的位置.

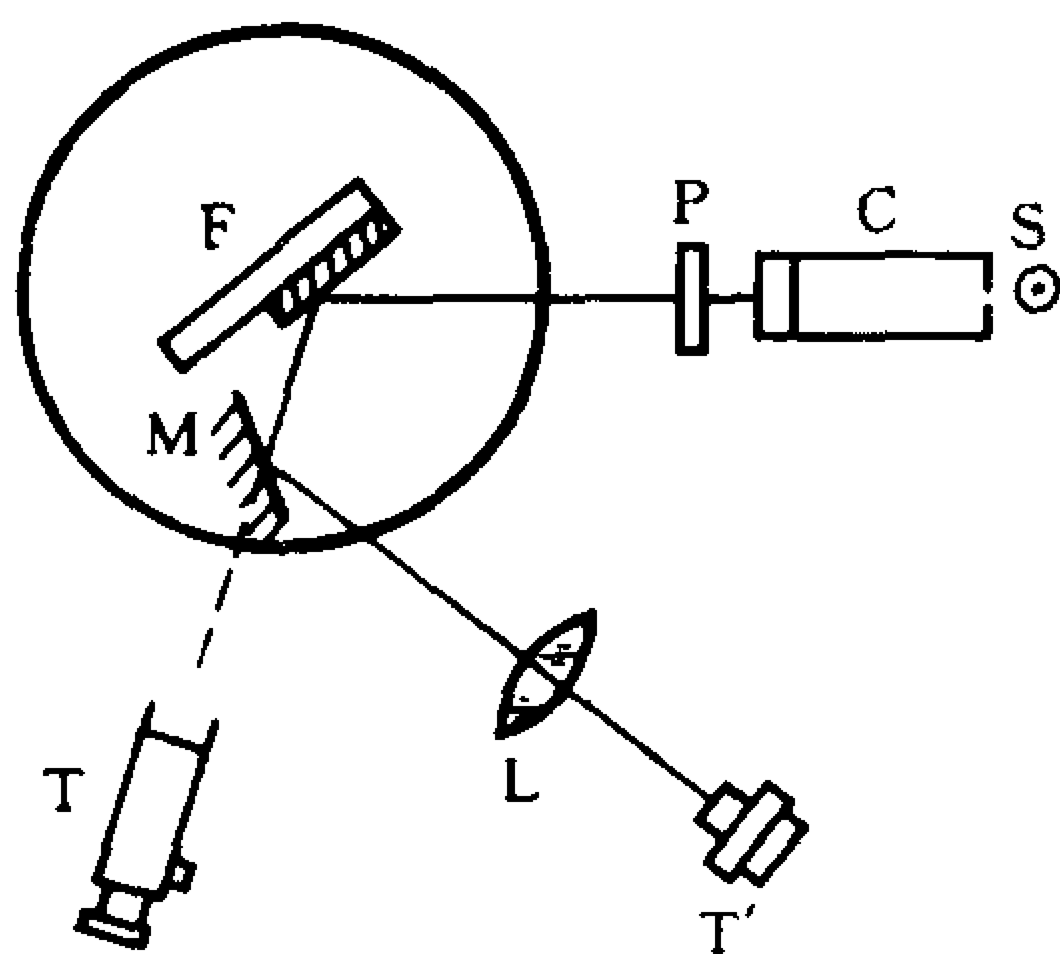


图 17－3

4. 在准直管物镜前加一偏振片 P,转动偏振片,使其透光截面平行于样品的入射面,以获得 TM 波.

5. 为测定 i_B，必须旋转平台. 由于平台的旋转，光线的入射角在不断改变，而样品表面反射光的方向亦将随之改变. 如图17－3所示，在样品 F 的近旁，添置一块平面镜 M，则 M 和 F 就构成一个恒偏向装置，当平台旋转时，经 F、M 反射的平行光的方向将不随平台的旋转而变化，即出射光与入射光之间的夹角为常量. 可用透镜 L 和测微目镜组成的监测装置，在 M 的反射光方向上，即可观察到样品表面的光强分布情况.

缓慢地转动平台，通过测微目镜 T′能看到样品表面镀膜区和非镀膜区的明暗对比不断变化. 当视场的明暗界线消失时，固定平台，则相应的入射角即为膜层介质的布儒斯特角 i_B.

（问：分析一下，加平面镜后呈现恒偏向的原理.）

6. 取下平面镜 M，用望远镜对准 F 的反射光方向，记录其方位 T_1，再将望远镜直接对准准直管，记录其方位 T_2，由此求出入射光线和反射光线的夹角 θ，则入射角 i_B 应等于 $\frac{1}{2}(\pi-\theta)$，测量几次，取平均值，代入式(17－1)计算薄膜介质的折射率，并与公认值比较.

复习思考题

1. 使用图 17－3 装置测定 i_B 有什么特点？不采用该装置能不能进行 i_B 的测量？怎样进行？

2. 当分光计平台旋转时，在测微目镜视场里看到镀膜样品表面像的位置仍有变动，为什么？

3. 本实验测量方法对于镀膜介质的折射率和膜层的厚度有无限制？为什么？

4. 试估计由于偏振片的透光截面与样品入射面偏离给测量带来的影响.

实验十八　硅光电池的线性响应

目的

1. 了解光电池线性响应的实用意义；
2. 学习和掌握测定硅光电池线性工作范围的一种方法.

仪器和用具

溴钨灯，尼科尔棱镜(或偏振片)一对，硅光电池，灵敏电流计，六柄电阻箱二只，直流稳压电源，聚光透镜，电键.

原理

硅光电池是用半导体材料硅制成的实验室常用光电探测器.它的基体就是一片掺有微量杂质的单晶硅，两面敷以透明电极，受光照以后，即在半导体材料的受光面与背光面之间的电极上产生电势差，称为光生伏打效应. 若将灵敏电流计与光电池联接，则在回路中产生光电流. 电流计光点偏转的格值与入射光的强度有关. 如果光电流的大小与入射光照度有线性关系，则用光电池探测光信号强度，可进行客观、准确而不失真的测量.

线性响应是光电探测器的重要性能指标之一，也是实际使用光电池时必须保持的正常工作条件. 但是在测量各种光信号的强度时，信号强度变化幅度可能较为悬殊，因此使用光电池前，必须了解它的线性响应的强度范围. 本实验运用马吕斯定律改变照射在光电池上的入射光照度，以测定其线性工作范围. 这种测定方法也可应用于其它光电探测器.

如图 18－1 所示，平行光通过起偏器棱镜 N_1 后，形成强度为 I_0 的平面偏振光，其偏振方向平行于棱镜的主截面，如果使该平面偏振光再通过检偏器棱镜 N_2，由马吕斯定律可知，透过 N_2 的透

射光强 I 为

$$I = I_0\cos^2\alpha \tag{18-1}$$

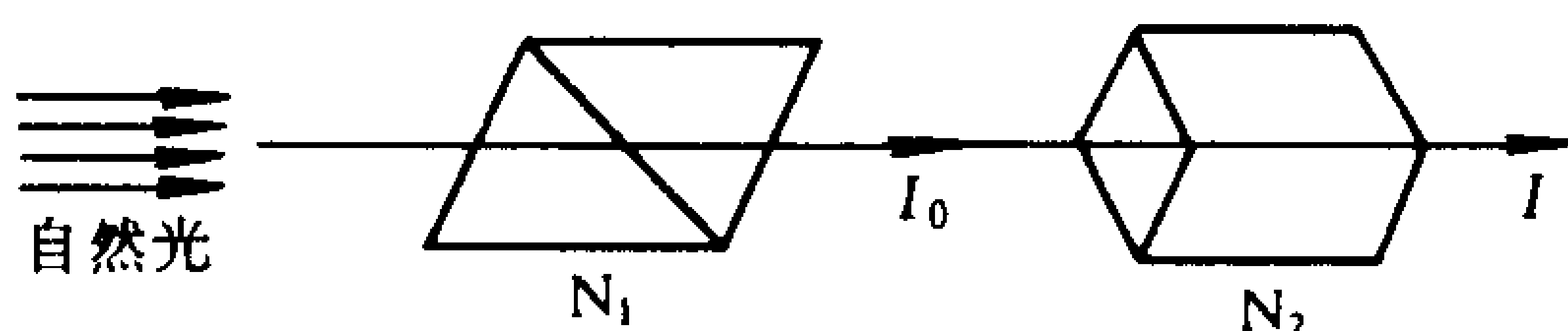


图 18-1

式中 α 为两偏振棱镜主截面之间的夹角. 由式(18-1)可见,透过 N_2 的光强随 α 的不同而变化. 现将该透射光照射在光电池上,假设硅光电池的工作范围处于线性响应区域,则由硅光电池产生的光电流 i 应与入射光的强度 I 成正比,即 $i = c_1 I$(c_1 为常量),将此关系代入式(18-1),得

$$i = c_1 I_0\cos^2\alpha$$

或 $$i = c_2\cos^2\alpha \quad (c_2 = c_1 I_0 \text{ 是常量})$$

将上式两侧取对数,则

$$\lg i = \lg c_2 + 2\lg\cos\alpha, \tag{18-2}$$

此式表示,变量($\lg\cos\alpha$)和($\lg i$)间在 $i = c_1 I$ 成立条件下,存在线性关系,并且斜率为 2. 测量不同 α 角时的电流值 i,作 $\lg i - \lg\cos\alpha$ 图线,此图线一般为曲线,但其中有一段是斜率为 2 的直线,该段直线对应的电流变化范围,就是该硅光电池的线性工作区域.

实验内容

1. 按图 18-2 安置实验装置,光源 S 为溴钨灯,经透镜 L 后射出平行光,经过尼科耳棱镜,照射到待测硅光电池 P_c 上,灵敏电流计 G 显示出光电流值. 尼科耳旋转角由刻度盘读出.

2. 由于半导体硅的固有特性,硅光电池的内阻随入射光强增大而减小,硅光电池产生的光电流除与入射光强有关外,还与外电

路负载电阻有关. 根据光电池的等效电路分析(参阅§2)可知,外负载电阻愈小,光电池线性响应程度愈高. 若用灵敏电流计显示,则外负载电阻即电流计内阻 R_g,所以一般应选用低内阻型灵敏电流计. 但在测量硅光电池的线性工作范围时,光电流变化范围较大,则必须改变电流表的量程. 为了保持改变量程时,外接电阻总阻值不变,可采用图 18-2 所示的电路,即先将 R_1 与 R_g 串联,再和 R_2 并联后接入光电池电路,当满足关系式

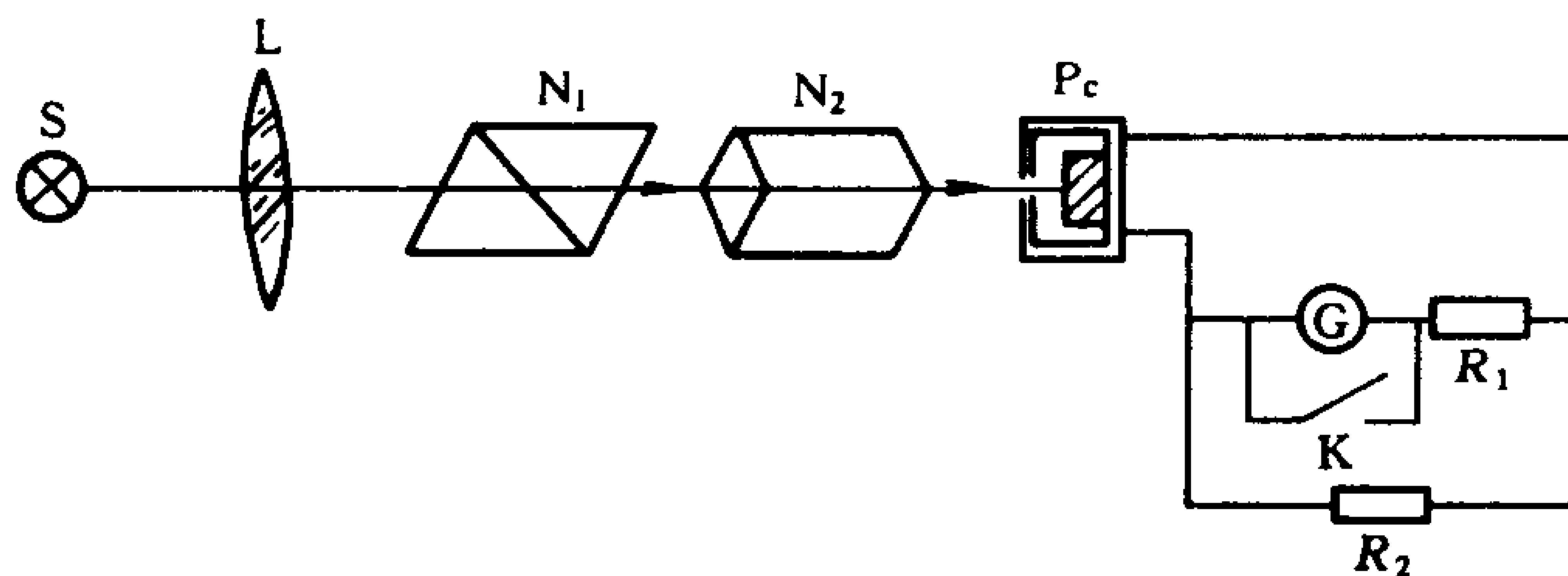


图 18-2

$$\begin{cases} R_1=(n-1)R_g \\ R_2=\dfrac{n}{n-1}\cdot R_g \end{cases} \qquad (18-3)$$

时,光电池外负载电阻总值保持不变. 式中 n 为电流计量程的扩大倍数. 一般选 $n=3,10,30,100,\cdots$ 等. (问:自己能推导出式(18-3)吗?)

3. 测定硅光电池的线性工作范围

(1) 调节光路,使之共轴.

(2) 转动尼科耳棱镜,使两棱镜 N_1 和 N_2 的主截面正交(消光),这时灵敏电流计的指示应为零,但是由于漏电流和背景杂散光的干扰,电流计示值一般不为零,在以后光电流测量值中均需扣除此项影响. (问:如何减少杂散光的干扰?)

(3) 固定光源的工作电压,保持一定的光照度. 从消光位置开始,逐次改变 α 值,测出相应光电流 i,作 $\lg i-\lg\cos\alpha$ 曲线. 确

定斜率为 2 的直线段对应的电流变化范围.

(4) 提高光源的工作电压，尽量扩大光强变化范围，再作 $\lg i-\lg\cos\alpha$曲线.

(5) 换用高内阻的电流计(AC15/1 型)，用同样方法测量 $\lg i-\lg\cos\alpha$曲线，与步骤(3)、(4)结果比较，以观察外负载电阻对光电池线性响应的影响.(问:扩大量程的 R_1、R_2 值是否不变?)

(6) 用照度计测定光电池受光面处的光照强度，标定与光电池线性工作范围对应的入射光照度的分布范围.

4. 对实验的结果作简要地描述.

复习思考题

1. 如测得光电探测器的 $\lg i-\lg\cos\alpha$ 图线为一直线，则光电流即与入射光强成正比，这句话对不对，为什么?

2. 光电探测器的线性响应在实际应用中有何重要性?

3. 应用尼科耳棱镜组改变入射光电池的光强时，尼科耳棱镜端面的反射光损失对实验测量有何影响? 试分析说明.

实验十九　全 息 照 相

目的

1. 了解全息照相记录和再现的原理；
2. 掌握漫反射全息照片的摄制方法；
3. 加深对全息照片特点的理解.

仪器和用具

防震全息台，氦-氖激光器，扩束透镜，分束棱镜（或分束板），反射镜（两片），毛玻璃屏，调节支架若干，米尺，停表（记时器），照相冲洗设备.

原理

普通照相底片上所记录的图像只反映了物体上各点发光（辐射光或反射光）的强弱变化，也就是只记录了物光的振幅信息，于是，在照相纸上显示的只是物体的二维平面像，丧失了物体的三维特征. 全息照相则不同，它是借助于相干的参考光束 R 和物光束 O 相互干涉来记录物光振幅和相位的全部信息.

如图 19-1 所示，设 xy 平面为全息底片平面，底片上一点 (x,y) 处物光束 O 和参考光束 R 的光场分布分别为

$$O(x,y,t)=O_o(x,y)e^{i\omega t} \tag{19-1}$$

$$R(x,y,t)=R_o(x,y)e^{i\omega t} \tag{19-2}$$

其中

$$O_o(x,y)=A_o(x,y)e^{i\varphi_o(x,y)} \tag{19-3}$$

和

$$R_o(x,y)=A_r(x,y)e^{i\varphi_r(x,y)} \tag{19-4}$$

为物光束和参考光束的复数振幅. 由于它们系相干光束，所以全息底片上的光强是它们合振幅的平方[为了书写简便，略去$(x,$

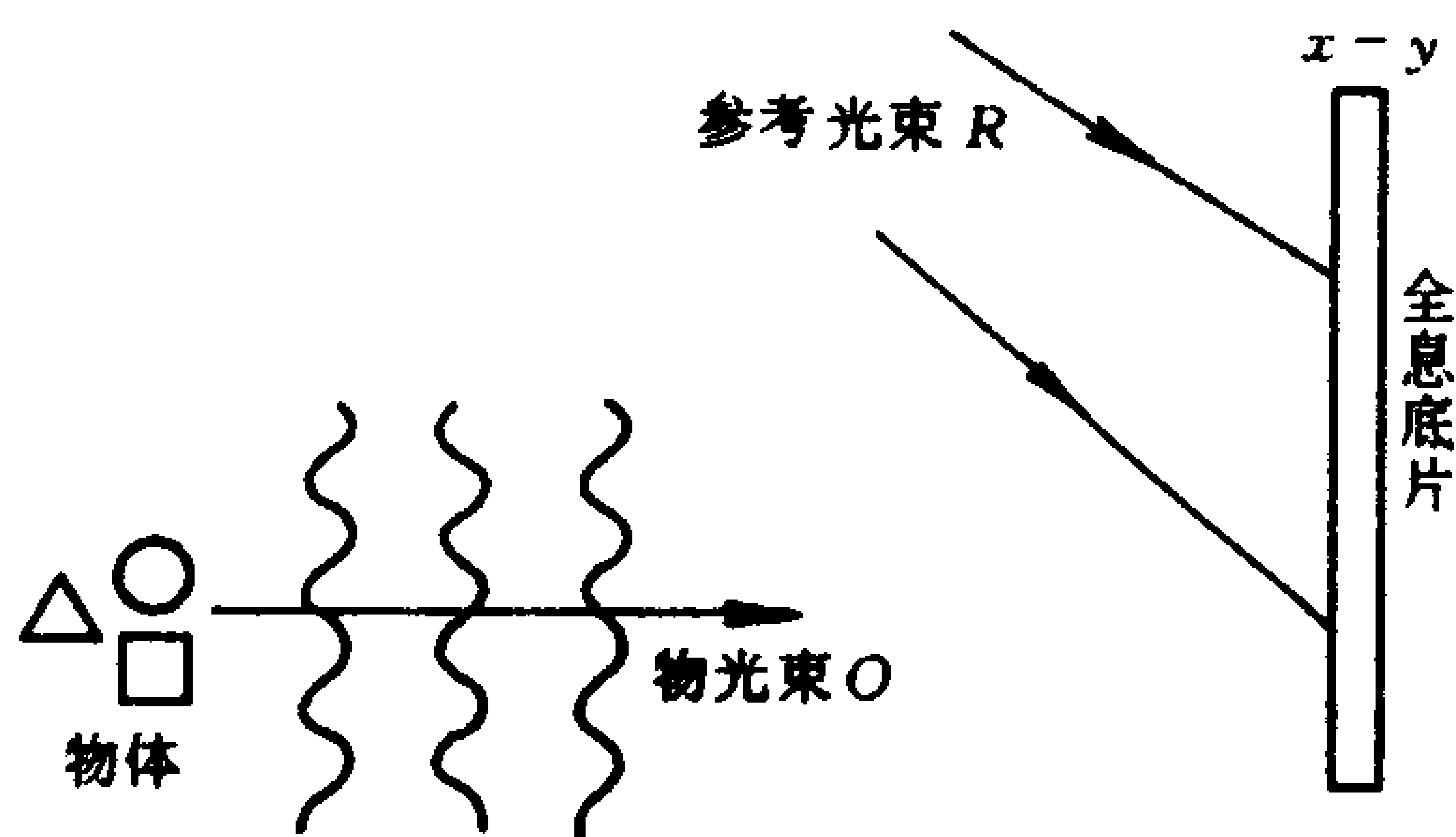


图 19-1

$y)]$,即

$$
\begin{aligned}
I(x,y) &= |O_o+R_o|^2 = O_oO_o^* + R_oR_o^* + O_oR_o^* + R_oO_o^* \\
&= A_o^2 + A_r^2 + A_oA_r e^{i(\varphi_o-\varphi_r)} + A_oA_r e^{i(\varphi_r-\varphi_o)} \\
&= A_o^2 + A_r^2 + 2A_rA_o\cos(\varphi_o-\varphi_r) \qquad (19-5)
\end{aligned}
$$

式(19-5)右边三项中,第一项(A_o^2)反映了物光的光强,它在底片上不同位置有不同的大小. 第二项(A_r^2)反映了参考光的光强,由于 A_r 是均匀分布的,所以 A_r^2 构成了底片上的均匀背景. 第三项$[2A_rA_o\cos(\varphi_o-\varphi_r)]$反映了两束相干光的振幅和相对相位的关系. 这样的照相把物光束的振幅和相位两种信息全部记录下来了,因而称为全息照相.

全息照相底片上记录的不是物体的几何图形,而是一组记录着物光束的振幅和相位全部信息的不规则的干涉图样,所以又称为全息图. 全息图上干涉图样的明暗对比程度反映了物光波相对于参考光波之间振幅(强度)的变化,而干涉图样的形状和疏密变化则反映了物光波和参考光波之间的相位变化.

拍摄好的全息底片,经过适当的显影、定影和漂白处理后,底片上各点的振幅透射率与入射光强 $I(x,y)$的关系如下

$$t(x,y) = t_o + \beta|O_o+R_o|^2 \qquad (19-6)$$

其中 t_o 为底片的灰雾度,β 为比例常数(对于负片,$\beta<0$). 为了

重现物光的波前，必须用一相干光照射全息图，设照射到全息图上的相干光的复振幅也为 R_o，则透过全息图的复振幅 $A(x,y)$ 为

$$
\begin{aligned}
A(x,y) &= t(x,y)R_o = t_oR_o + \beta R_o|O_o + R_o|^2 \\
&= t_oR_o + \beta R_o(|O_o|^2 + |R_o|^2) + \beta R_oR_o^* O_o + \\
&\quad \beta R_oR_oO_o^* \qquad (19-7)
\end{aligned}
$$

式(19－7)表明经全息图透射后的光包含三个不同的分量：第一、二项代表的是强度衰减的直接透射光；第三项正比于 O_o，即除振幅大小改变外，原来的物光准确地再现了，波前发散形成物体(在原来位置上)的虚像；第四项是与物光共轭的光波，这意味着在虚像的相反一侧会聚成一个共轭的实像，如图 19－2 所示.

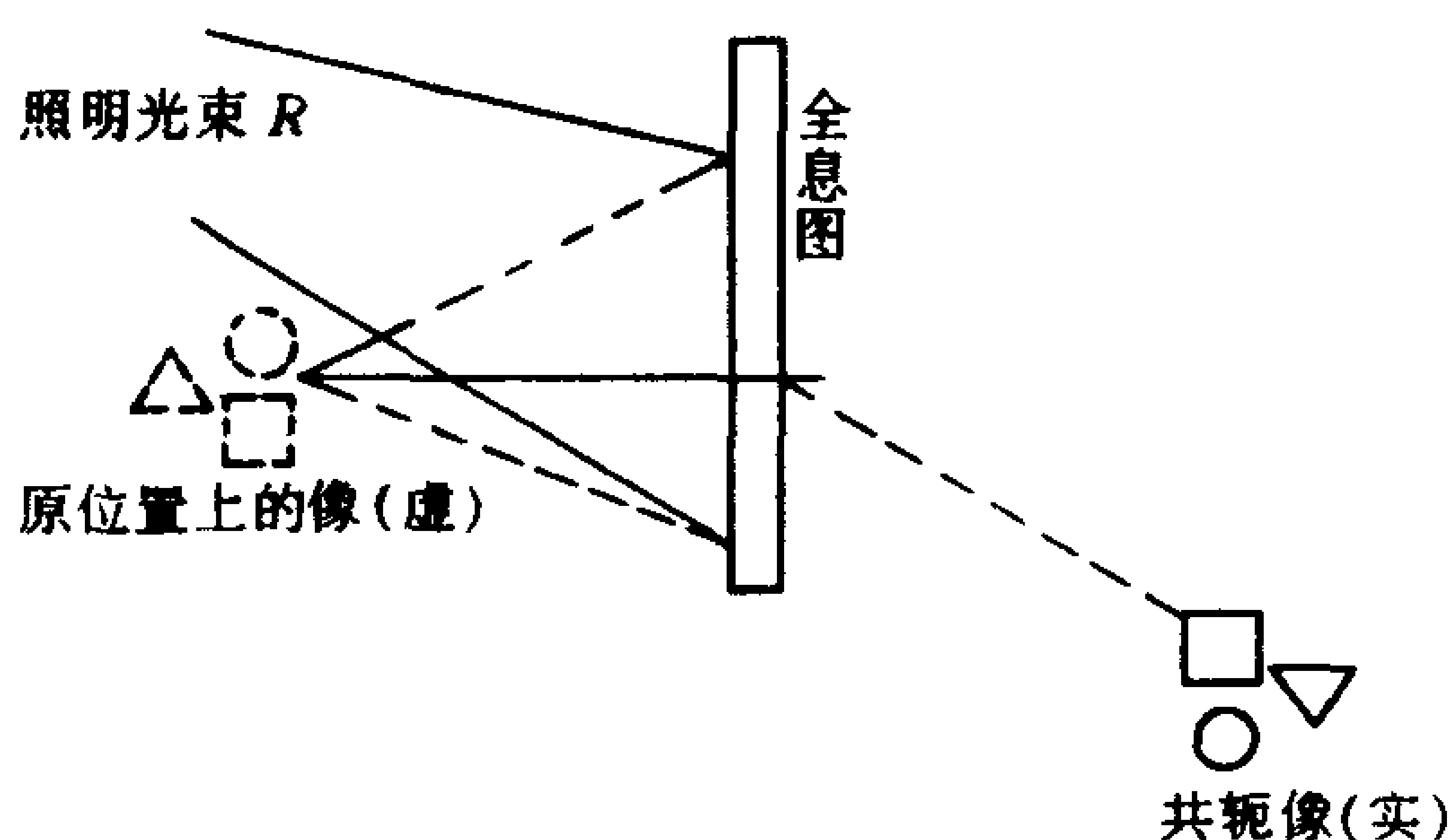


图 19－2

式(19－5)与式(19－7)表明，全息照相过程包含记录和再现两个过程：(1)用干涉方法记录物光波的全部信息，(2)用衍射方法再现物体的光学像. 下面以发光物点的全息照片为例，具体说明上述记录和再现的物理过程. 如图 19－3(a)所示，从发光点 O 发出的单色球面波与相干的平面参考光波 R 在感光底片上叠加曝光的结果，形成一组明暗相间的同心干涉圆环，条纹的分布是中间稀疏而边部稠密，底片经冲洗后，干涉亮纹处形成不透光暗环，暗条纹处则形成透光环，因此点光源的全息图是一片具有不等间隔的圆光栅，其间隔从中心到边缘逐渐减少.

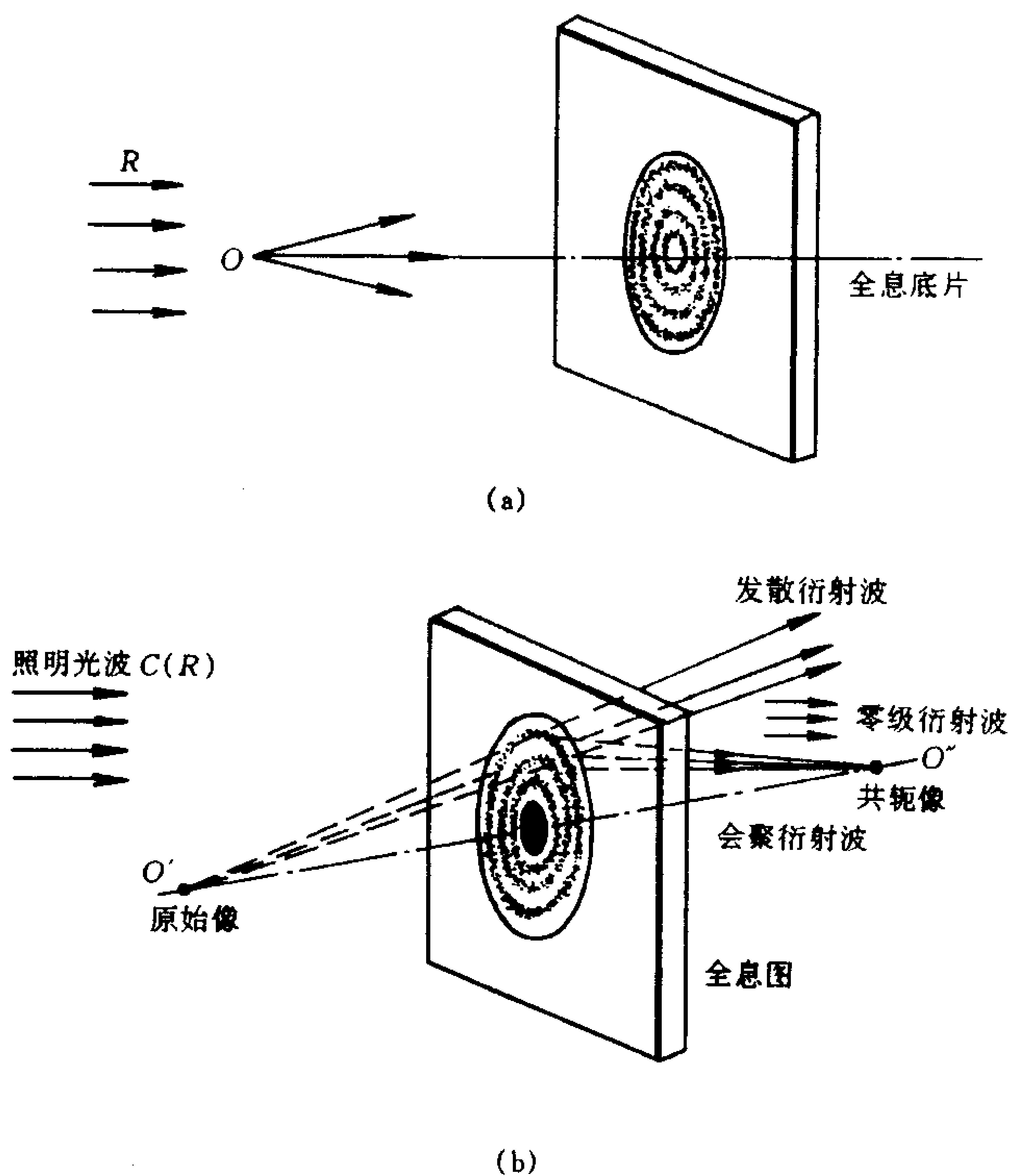


图 19-3

当用平行光照明该全息图时，如图 19-3(b)那样，每一透光的干涉环均要产生衍射，衍射光波具有旋转轴对称的特性，其衍射角随着光栅间隔的减小而增大，正一级发散的衍射波重现了物点 O 的原始虚像 O'，负一级会聚衍射光波则形成了物点 O 的共轭实像 O''.

因为任意物体是由许多独立发光点所组成，如图 19-1 所示，记录时，每一点发出的光波均与参考光波形成各自的全息图，这些点源全息图的叠加就构成该物体的全息照片，显然它是一组复杂而不规则的干涉图样，而不是物体的几何图样. 如图 19-2 再现

时，各原始像点的组合就形成了整个物体逼真的立体再现像 O'. 共轭像点的组合则形成整个物体的共轭像 O''，通常它是处于观察者同侧的实像.

全息再现像的位置、虚实和大小是完全确定的，具体可由物点的位置、参考光源和再现照明光源的位置决定. 如图 19－4 那样

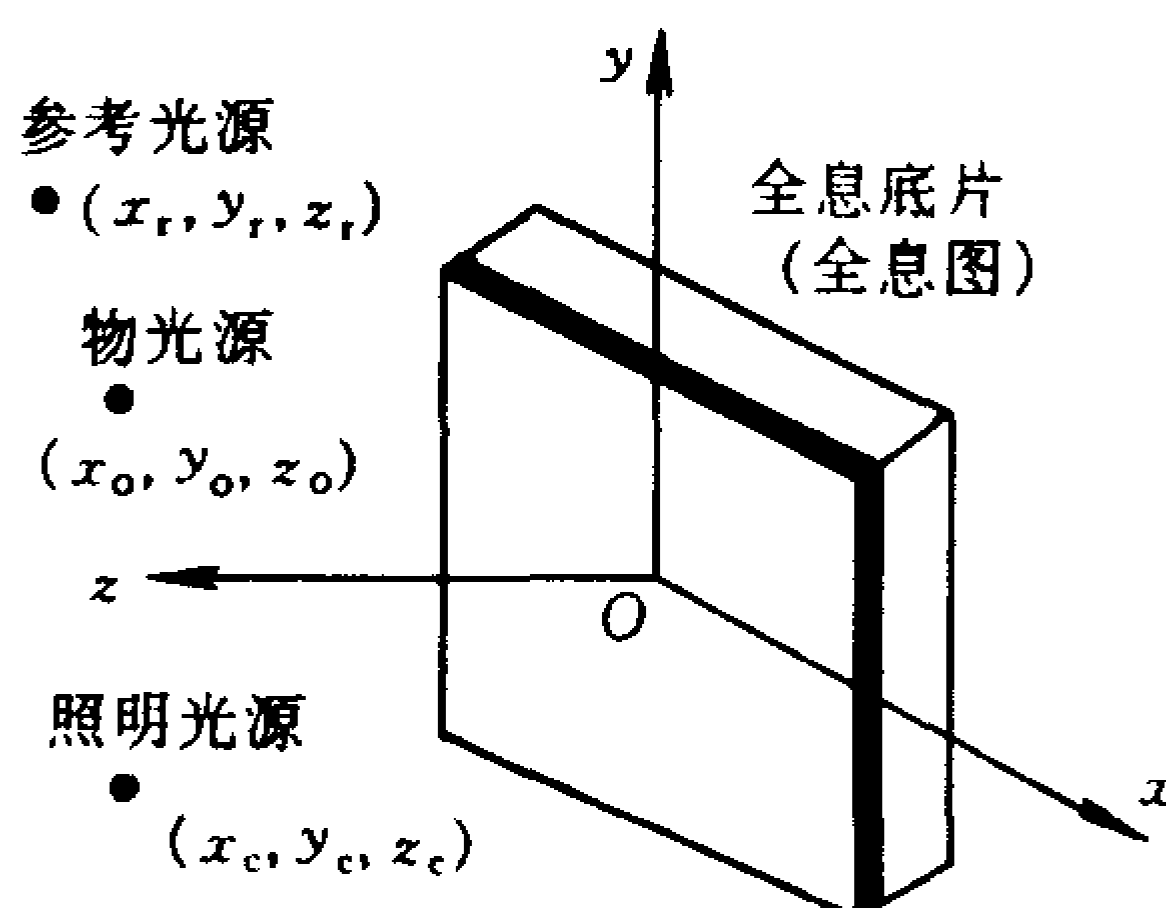


图 19－4

选定坐标系，原点位于全息照片的中心，物点的位置为 (x_o, y_o, z_o)，参考点源和再现点源的位置分别为 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_c, y_c, z_c)，且设 z_o、z_r、z_c 均大于零，即都位于全息图的左侧. 可以证明，两个再现像都是一个点，其位置 (x_i, y_i, z_i) 可由下式确定

$$\begin{cases} x_i = \left(\pm \dfrac{x_o}{z_o} \mp \dfrac{x_r}{z_r} + \dfrac{x_c}{z_c} \right) z_i \\ y_i = \left(\pm \dfrac{y_o}{z_o} \mp \dfrac{y_r}{z_r} + \dfrac{y_c}{z_c} \right) z_i \\ z_i = \left(\dfrac{1}{z_c} \mp \dfrac{1}{z_r} \pm \dfrac{1}{z_o} \right)^{-1} \end{cases} \tag{19-8}$$

式中上面一组符号适用于原始像，下面一组符号适用于共轭像. 像的位置由 z_i 的符号决定，如 $z_i>0$ 时为虚像，位于全息图左侧；反之，$z_i<0$ 时，则为实像，位于全息图的右侧. 如参考光波与再现照明光波相同，则由式(19－8)知，$z_i = \pm z_o$，即原始像为虚像，共

轭像为实像．再现像的大小可由放大率表示，当参考光和再现照明光波长相同时，两种放大率分别为

$$横向放大率\begin{cases} M_x = \dfrac{\partial x_i}{\partial x_o} = \pm\dfrac{z_i}{z_o} = \left(1 \pm \dfrac{z_o}{z_c} - \dfrac{z_o}{z_r}\right)^{-1} \\ M_y = \dfrac{\partial y_i}{\partial y_o} = M_x \end{cases} \tag{19-9}$$

$$纵向放大率 \quad M_z = \frac{\partial z_i}{\partial z_o} = \pm M_x^2 \tag{19-10}$$

由上式可知，当 $z_r = z_c$ 时，对于原始像 $M_x = M_y = M_z = 1$，像与原物相似，但对于共轭像，$M_x = M_y \neq M_z$，像要发生畸变，形状失真．

全息照相作为一种新型的成像方法，它的显著特点是：

1．因全息图具有光栅结构，经其衍射的成像光束总有两支，因此所成像总是孪生的一对．物体的原始像与共轭像共存，不像光学透镜成像那样是唯一的．

2．全息再现像不是普通照相那样的二维平面图像，而是形象逼真的三维立体图像．具有明显的视差和纵深视觉效应．

3．因为全息照片上的每一处都记录了物体上所有物点发出的光信息，而物体上每一物点发出的光信息均布满在全息照片的全部面积上，因此，一张破碎了的全息图残片仍能重现出物体的全貌，只是分辨率受些影响，而普通照相底片一旦破碎就无法再冲洗印相了．

实验内容

1．检查全息台的稳定性

将各光学元件按图 19－5 所示，在防震全息台上布置成一迈克耳孙干涉仪的光路，以检查全息台的防震性能．如果在远大于曝光所需的时间内，屏上干涉圆环的“涌出”或“陷入”少于四分之一个环时，全息台可以使用，否则还要调节全息台．

2．布置与调整全息光路

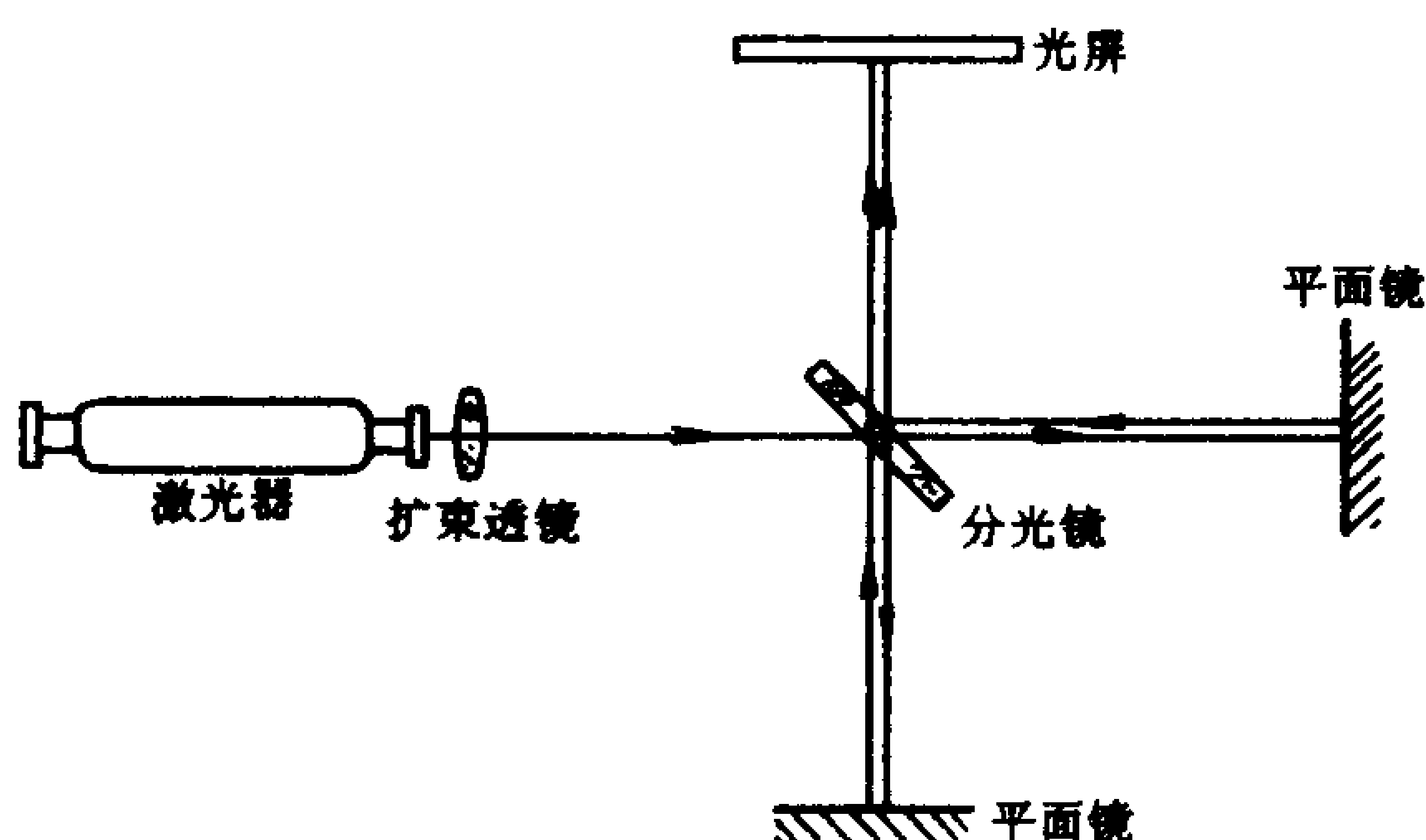


图 19－5

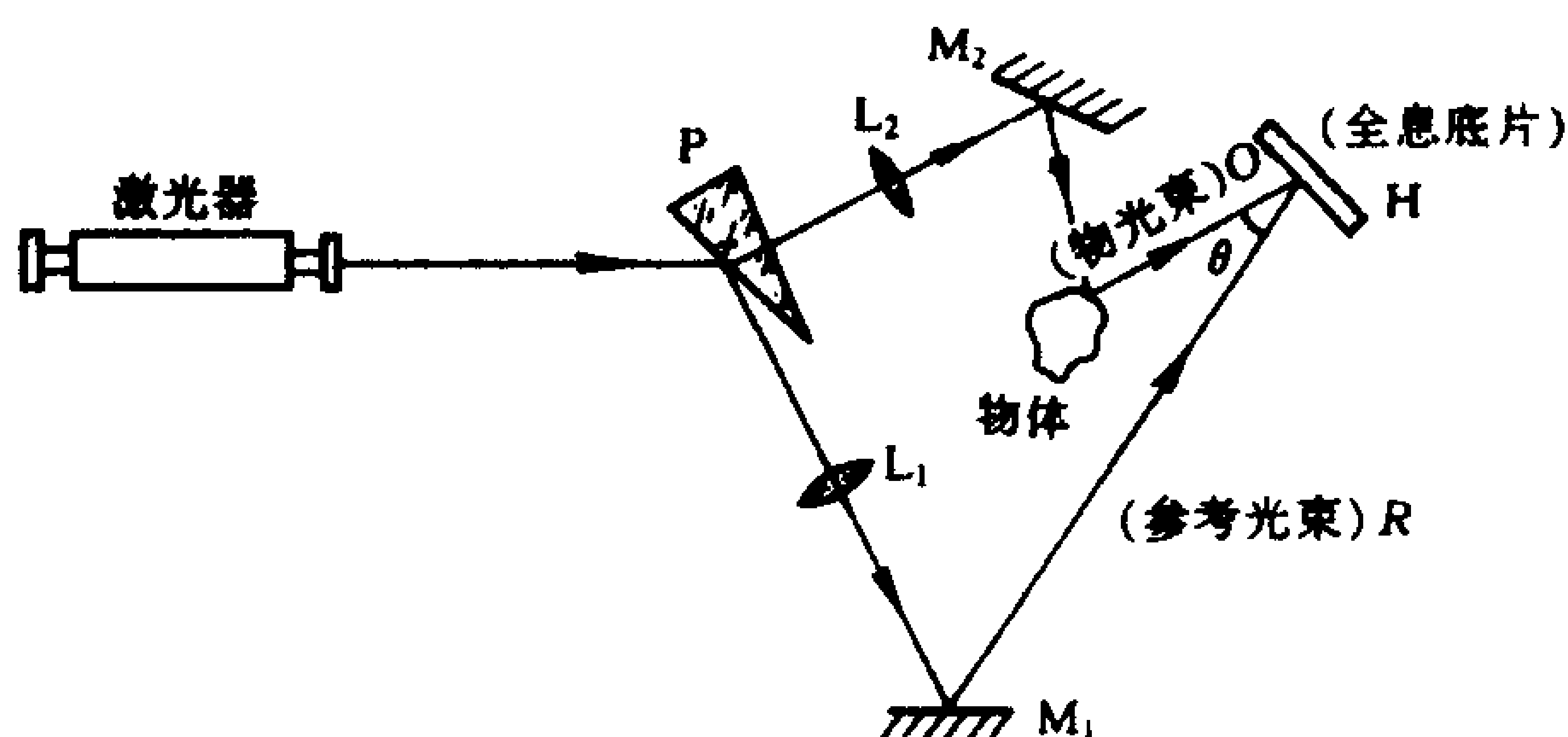


图 19－6

如图 19－6 所示是一种拍摄漫反射全息照片的参考光路．布置好各光学元件，并进行光路调节，调节时要注意：

(1) 物光和参考光的光程差必须小于所使用激光的相干长度，最好是使它们的光程大致相同．两束光的光程应自分束器量起．最大光程差应小于激光管谐振腔长的四分之一．

(2) 物光束与参考光束的光强比选择要适当，以使全息照片具有最大的衍射效率．确切的比值应由全息底片的振幅透射率与感光特性来确定．一般说来，物光束与参考光束的光强比取在1∶2～1∶5之间是合适的，但不同底片有不同的感光特性，必须通过实验确定．虽然沿光路改变扩束透镜的前后位置可以变换光强

比，但是，由于物体是漫射体，投射到它上面的光能，只有很少一部分构成物光信息，因此只有以足够强的光照明物体，而且物体距离全息底片又不太远时，才能在底片上获得适当的光强比.

(3) 物光束与参考光束之间的夹角 θ 要适当，以小于 30°为宜.

3. 曝光

将全息底片放置在照相框架上，药膜面向着被摄物体，放好底片后稍等几分钟，待整个系统稳定后开始曝光，曝光时间由激光器功率、物体的大小和漫反射性能、底片的感光灵敏度等来定. 最佳时间应通过试拍确定.

4. 冲洗

包括显影、定影和漂白，其方法和普通照片冲洗完全相同. 漂白是为了增加衍射效率，提高再现像的亮度. 这是因为底片经过漂白，是将原来形成的银粒变为几乎完全透明的化合物，它的折射率和明胶的不同. 这样，记录采取了光程中的空间变化形式，而不像原初振幅全息图那样是光密度的空间变化(这种全息图又称相位全息图).

显影用 D19 型显影液，显影时间约 3 min(在 18～20 ℃).

定影用 F5 型定影液，定影时间约 5 min(在 18～20 ℃).

漂白用 R－10 漂白液，漂白时间待全息底片透明即可. R－10 漂白液配方如下：

溶液 A	重铬酸钾	20 g
	浓硫酸	14 ml
	加蒸馏水至	1000 ml
溶液 B	氯化钠	45 g
	加蒸馏水至	1000 ml

将一份 A 液和一份 B 液混合使用. 漂白过的全息图还须定影，以消除氯化银.

5. 再现

(1) 将拍摄好的全息照片放回原照相底片架，挡住物光束和

被摄物体，用原参考光照明，像即呈现在原物所在位置上，仔细观察再现像的特点.

(2) 如图 19－7(a)，用另一束扩束激光沿原参考光方向照射全息图，从 E 处观察再现虚像，改变位置，再从 E' 处观察虚像，比较观察结果，说明立体的视觉效应.（可由实验室提供一张全息照片，作以下观察分析用.）

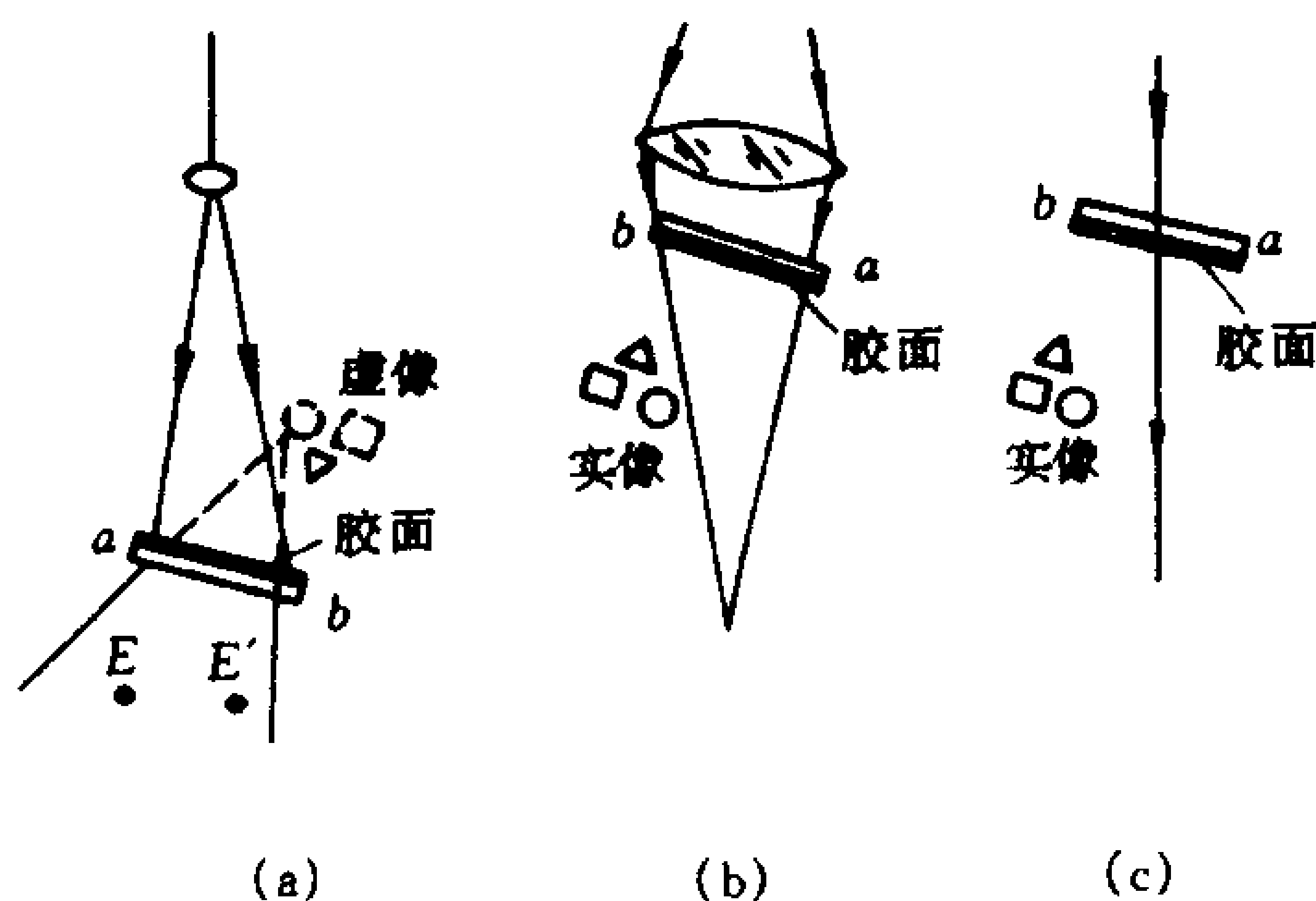


图 19－7

(3) 改变全息图至扩束透镜之间的距离，观察再现虚像的位置和大小的变化，并用式(19－8)说明.

(4) 用一张有直径约 5 mm 小孔光阑遮住全息图，通过小孔观察再现像有何变化？是否显现出被摄物体的全貌？移动小孔位置，仔细观察全息图，比较再现像的区别.

(5) 如图 19－7(b)，将全息图绕垂直轴旋转 180°，用会聚光束（原参考光的共轭光）照明，用白屏（或玻璃屏）在原被摄物附近将观察到实像，并注意观察再现像的"赝视"特点，赝视现象就是原来物体上离观察者近的物点，共轭像中的对应点反而离观察者远了，即看到的像与原物的凹凸状态相反，给人以特殊的感觉.

(6) 如图 19－7(c)，用未扩束的 He－Ne 激光直接照射全息图，除再现虚像外，在透射光一侧的白屏上还会有两个"再现实

像”，仔细观察两个“像”的区别，判断真伪，给出物理解释．

复习思考题

1．拍摄全息照相用的感光底片用正片和负片都可以，一般都是采用负片，这是为什么？

2．推导公式 $d=\dfrac{\lambda}{2\sin\dfrac{\theta}{2}}$．

式中 d 代表夹角为 θ 的两列平行光产生的干涉条纹的间距．

3．拍摄全息照片，为什么参考光的强度必须比物光大？

4．分析说明你观察的实验现象中，各种条件下形成的再现像的特点．

实验二十　阿贝成像原理和空间滤波

目的

1. 熟悉阿贝成像原理,进一步了解透镜孔径对成像的影响;
2. 加深对傅里叶光学中空间频谱和空间滤波等概念的理解;
3. 初步了解简单的空间滤波在光信息处理中的实际应用.

仪器和用具

光具座,氦氖激光器,溴钨灯(12V,50W),薄透镜若干,可变狭缝光阑,可变圆孔光阑,小圆屏光阑,全息光栅三块,光字物屏,游标卡尺,毛玻璃屏及白屏.

原理

近20年来,波动光学的一个重要发展,就是逐步形成了一个新的光学分支——傅里叶光学. 把傅里叶变换引入光学,在形式和内容上都已成为信息光学发展的起点,全息术和光学信息处理,作为傅里叶光学的实际应用发展极为迅速.

阿贝早在1873年研究显微镜成像原理时就指出,在相干光照明下,透镜成像可分为两个步骤:第一步是通过物的衍射光在透镜的像方焦面上形成一组衍射图样,这些衍射图样称为物的空间频谱;第二步则是各个频谱分量的再组合,使之在像平面上得到原物的像. 阿贝的二次衍射成像,实质上就是两次傅里叶变换.

设 $f(\zeta,\eta)$代表物平面上光场的复振幅分布,如图20－1所示. 首先,依照惠更斯－菲涅耳原理,在透镜像方焦面上的复振幅分布 $\mathscr{F}(x,y)$将为 $f(\zeta,\eta)$的傅里叶变换,即

$$\mathscr{F}(x,y)=\iint_{-\infty}^{\infty} f(\zeta,\eta)\mathrm{e}^{-i2\pi(\nu_x\zeta+\nu_y\eta)}\mathrm{d}\zeta\mathrm{d}\eta \qquad (20-1)$$

式中

$$\nu_x = x/F\lambda, \nu_y = y/F\lambda \tag{20-2}$$

为 x, y 方向的空间频率,量纲为 L^{-1};F 为透镜的像方焦距;λ 为光波的波长. $\mathscr{F}(x,y)$也称为光场的频谱函数,透镜的像方焦面则称为频谱面或傅氏面,并且 $f(\zeta,\eta)$是 $\mathscr{F}(x,y)$的逆傅里叶变换,即

$$f(\zeta,\eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} \mathscr{F}(x,y) e^{i2\pi(\nu_x\zeta+\nu_y\eta)} d\nu_x d\nu_y \tag{20-3}$$

可见它们是对同一光场分布的两种本质上等效的描述.

然后,再以频谱为物,则由于二次衍射,可以证明,在像平面上的复振幅分布 $f'(\zeta',\eta')$恰为 $\mathscr{F}(x,y)$的又一傅里叶变换,即

$$f'(\zeta',\eta') = \iint_{-\infty}^{\infty} \mathscr{F}(x,y) e^{i2\pi(\nu_x\zeta+\nu_y\eta)} dx dy \tag{20-4}$$

比较(20－4)和(20－3)两式可得

$$f'(\zeta',\eta') = (F\lambda)^2 f(\zeta,\eta) \tag{20-5}$$

这样,经过两次衍射过程,第一次衍射将物光场的空间分布变换成空间频谱,第二次则又经一次变换将空间的频谱分布还原为像场的空间分布;结果是物平面和像平面上共轭点的复数振幅之比是常数,亦即像平面光振动的实数振幅和相位分布和物平面上的分布完全对应,因而像与物在几何上一致(可能有放大或缩小).

图 20－1 显示了成像的这两个步骤. 为了简便起见,假设物是一个一维光栅,光栅常量为d,即$f(\zeta)$是一个空间的周期性函

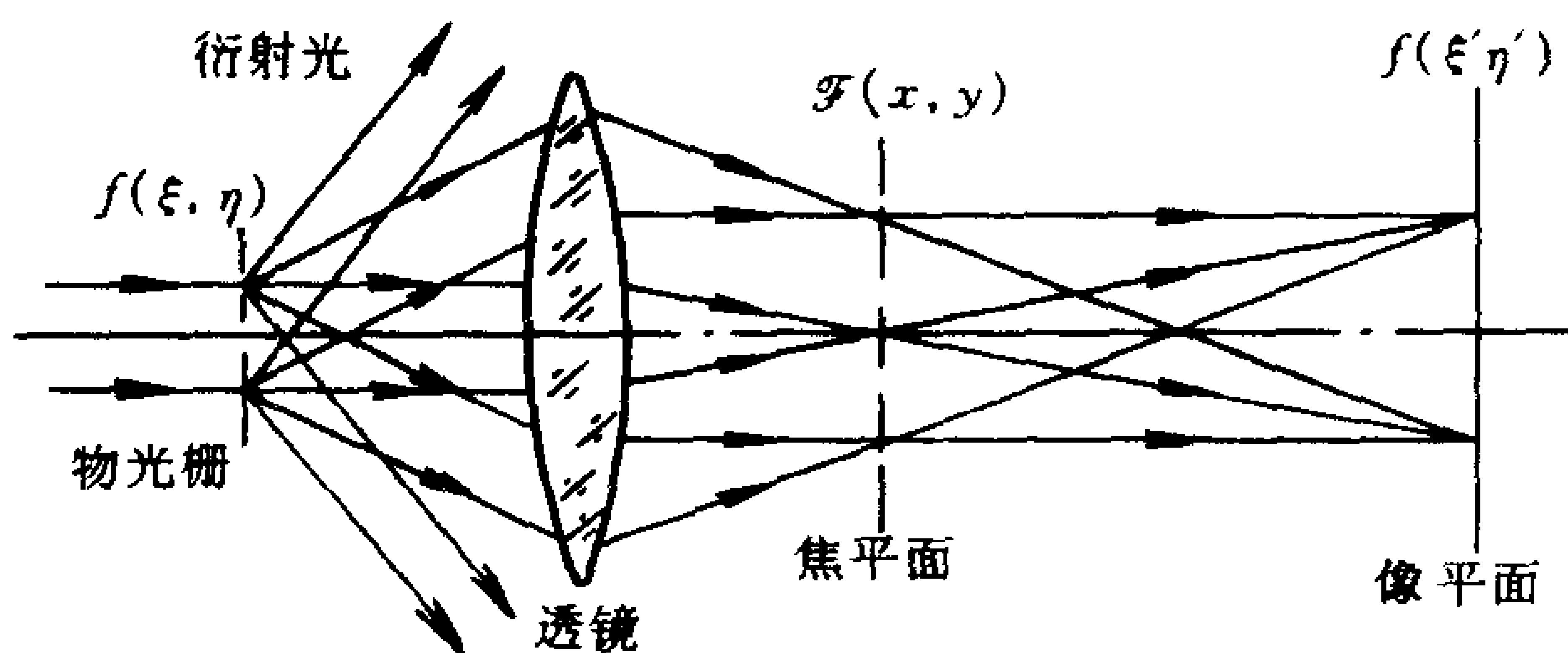


图 20－1

数，其空间频率为 ν_0（即 $\nu_0=1/d$）. 当波长为 λ 的单色平行光照明光栅时，则其光振幅分布可展开成级数

$$f(\zeta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathscr{F}_n e^{i2\pi n\nu_0 \zeta}$$

相应的空间频率分布为 $\nu=0$、ν_0、$2\nu_0$、…，它们是不连续的；相当于在透镜像方焦面上形成的衍射条纹中的零级、一级、二级……主极大. 这是由于经衍射后，物光波分解成为许多分立的、具有不同空间频率的衍射分量，每一个分量则相应于沿一定方向传播的平行光束，经透镜聚焦后，形成衍射条纹. 衍射角越大，衍射级次越高，空间频率也越高. 然而当代表不同空间频率的光束又重新在像平面上相干叠加后，则复合构成原物（光栅）的实像.

一般说来，像和物不可能完全一样，这是由于成像透镜的孔径是有限的，总有一部分衍射角度较大的高频信息不能进入透镜而被丢弃，使像的信息少于物的信息. 因此，透镜作为最简单的成像系统，就成像光束的空间频率来说，是一个低通滤波器. 当物光栅很密或透镜通光孔径很小时，则物光波中相应于一级衍射极大的分量（其空间频率即为光栅的频率 ν_0）也不能通过透镜，这时像平面上将得不到物光栅的像. 但是高频信息主要是反映物体的精细结构的，如果高频信息因受阻而不能到达像平面，则像无论怎样被放大，也不可能在像平面上显示出这些细节. 这就是光学仪器的分辨率受到限制的根本原因.

如果在透镜像方焦面上人为地插入一些滤波器（吸收板或移相板），以改变焦平面上不同空间频率的光振幅和相位的分布，就可以根据需要改变频谱以至像的结构，这就是空间滤波. 最简单的滤波器就是放置在透镜焦平面上的特种形状的光阑，它仅使一个或几个频率分量通过，而挡住其它的频率分量，从而使像质发生变化. 观察这些现象能使我们对空间傅里叶变换和空间滤波有更明晰的概念.

实验内容

一、解释阿贝成像原理实验(一)

1. 共轴光路的调节，即首先调节细束激光平行于光具座导轨.

如图 20－2 所示，将小圆孔光阑 D 插在光具座的滑块上，并靠近激光管的输出端. 上、下、左、右调节激光管，使激光束能穿过小孔；然后将小孔移远，如光束偏离光阑，调节激光管的俯仰和侧转，再使激光束能穿过小孔. 重新将小孔光阑移近激光管，反复调节，直至小孔光阑在光具座上平移时，激光束均能通过小孔光阑，则激光束已与光具座导轨平行. 记录激光束在光屏上的照射点 O 的位置.

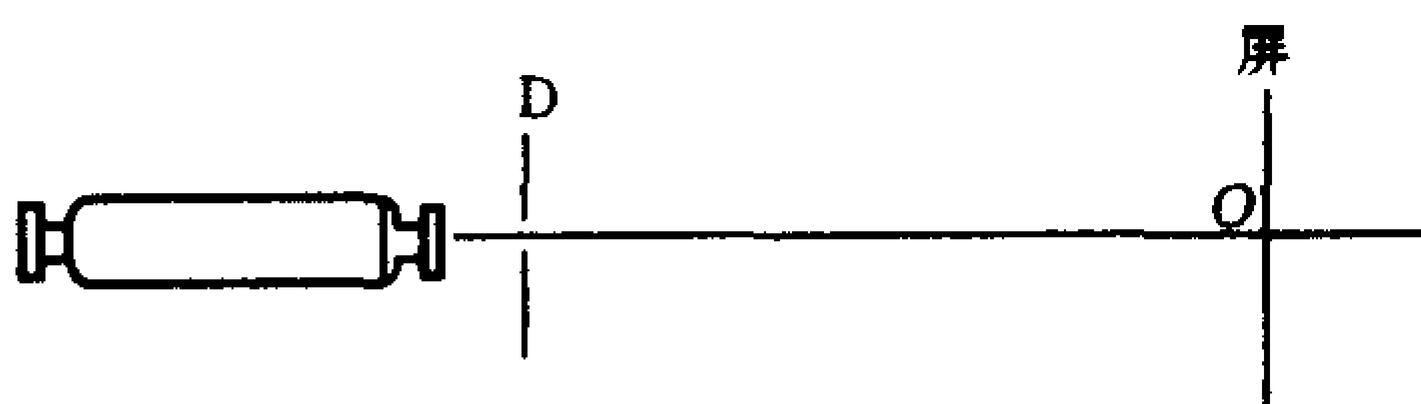


图 20－2

在以下实验中逐个加入光学元件，使激光束通过各元件中心，即照射在光屏上的光斑中心始终位于同一位置 O.

2. 将一个 30～50 条/mm 的一维光栅作物放在光具座上，用激光器发出的细锐光束垂直照射光栅.

3. 用一短焦距的薄透镜(焦距 6～10 cm)组装一个放大的成像系统. 调节透镜位置，使光栅狭缝清晰地成像在 4 m 以外的白屏上，其光路如图 20－3 所示，调节光栅，使屏上的条纹像沿竖直方向.

4. 此时物(光栅)的位置接近于透镜的物方焦面，故透镜的像方焦面就是其傅氏面，该面上的光强分布即为物的空间频谱.

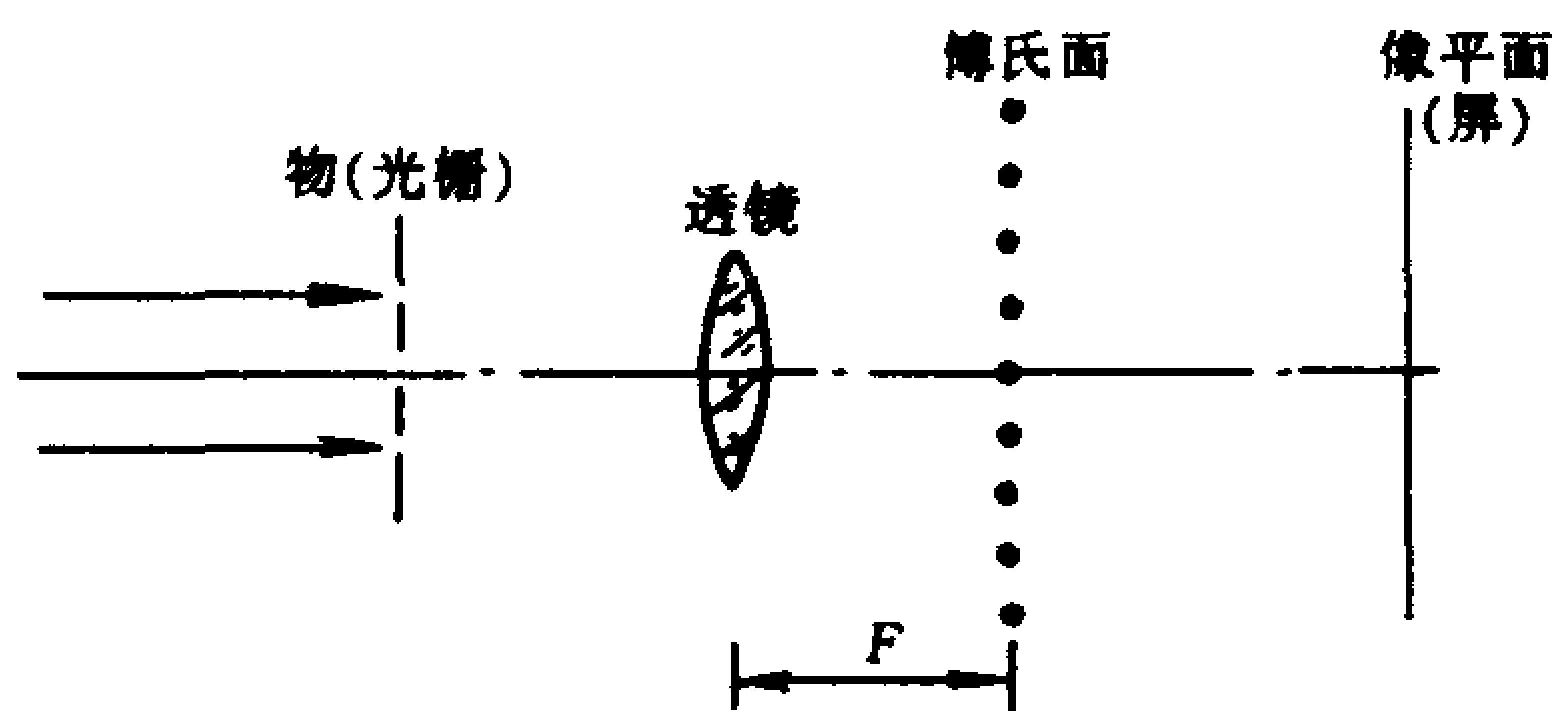


图 20－3

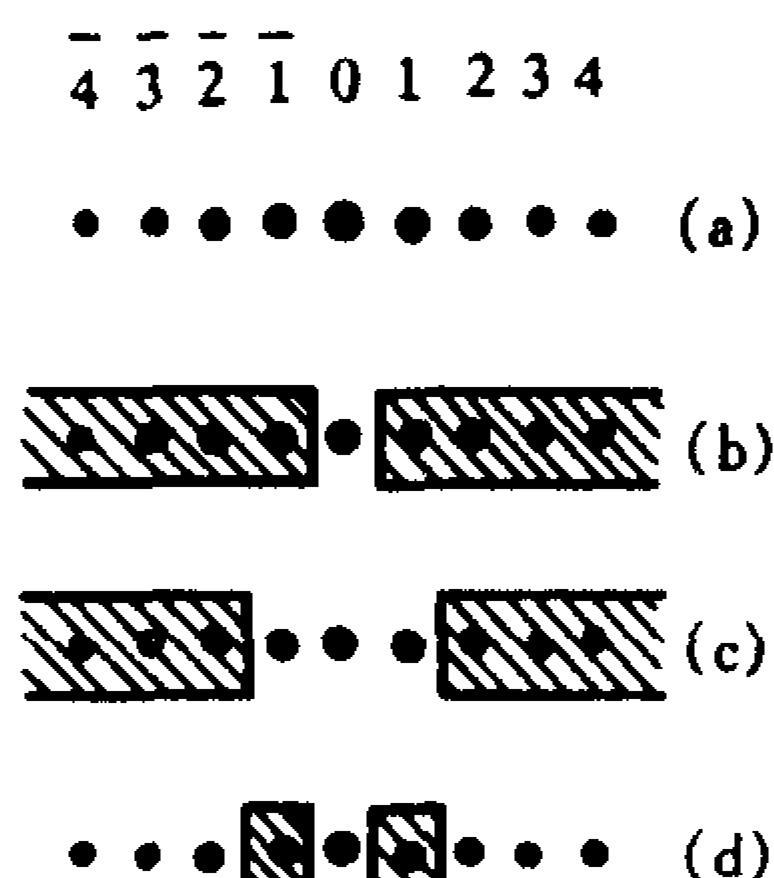


图 20－4

将一块毛玻璃屏放在透镜像方焦面上，就可以看到水平排列的一些清晰光点，如图 20－4(a)，这些光点相应于光栅的 0、±1、±2、…级的衍射极大值．用尺(或游标卡尺)测出各光点与中央主极大亮点的距离 x，将 x、透镜焦距 F 及光波波长 λ 代入式(20－2)，求出这些光点相应的空间频率，并和物光栅的实际空间频率进行比较，求出它们之间的关系．

5. 在透镜像方焦面处放一可调光阑作为空间滤波器．挡住 0 级以外的各光点，如图 20－4(b)，此时在屏上虽有足够的光强，但看不到光栅条纹像，为什么？

6. 调节光阑，使通过 0 级和 ±1 级极大值，如图 20－4(c)，而挡住 ±2 级以上的各光点，这时屏上有没有光栅条纹像？记录所观察到的现象．

7. 继续开大光阑，使 ±2 级或更高级的衍射光都能通过，注意观察所成的像，并注意观察与仅有 0、±1 级极大值通过时所成的像的区别．

8. 在傅氏面上用一光阑仅仅挡住 ±1 级，而保留 0 级以及 ±2 级以上极大值，如图 20－4(d)，观察屏上条纹像的宽度变化，可用游标卡尺测量 10 个条纹的宽度作比较，并说明变化的原因．

二、解释阿贝成像原理实验(二)

1. 保留上述光路,用一个正交全息光栅代替上面的一维光栅. 调节光栅,使条纹像分别处于竖直和水平的位置. 这时在透镜像方焦面上可以观察到二维的分立光点阵(即正交光栅的频谱),而在像平面上则看到正交光栅的放大像,如图 20-5(a) 所示.

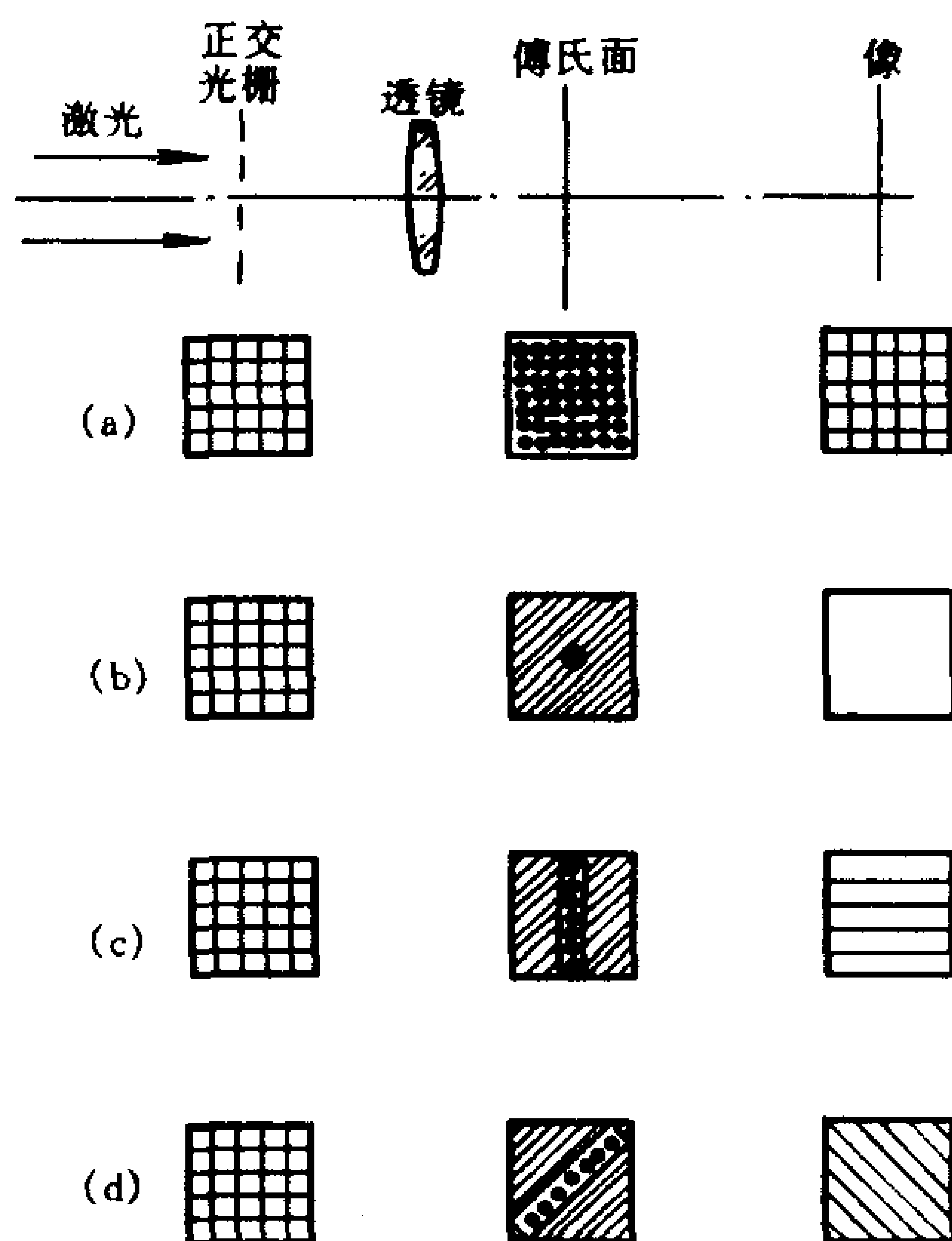


图 20-5

2. 如果在透镜像方焦面上加一小的光阑作为空间滤波器. 仅仅使中间轴上的光点通过,则在像平面上虽有光斑,但看不到图像,如图 20-5(b)所示.

3. 换用一可旋转的狭缝光阑作为空间滤波器. 仅使竖直通过光轴的一系列光点通过,其它光点被挡住,则在像平面上只观察到水平条纹,而看不到竖直条纹,如图 20-5(c). 如将光阑绕轴转

动 90°，则像平面上只看到竖直条纹而看不到水平条纹.

4. 再将狭缝光阑转过 45°，如图 20－5(d)所示，观察此时像平面上条纹分布的方位和条纹宽度的变化.

5. 用一圆屏光阑仅挡住中央零级光点，而使其它光点通过，观察像平面上强度分布的反转变化(与图 20－5(a)对比).

6. 说明上述实验结果.

三、空间滤波实验(一)

由无线电传真所得到的照片是由许多有规律地排列的像元所组成，如果用放大镜仔细观察，就可看到这些像元的结构，能否去掉这些分立的像元而获得原来的图像呢？由于像元比图像要小得多，它具有更高的空间频率，因而这就成为一个高频滤波的问题. 下面的实验可以显示这样一种空间滤波的可能性.

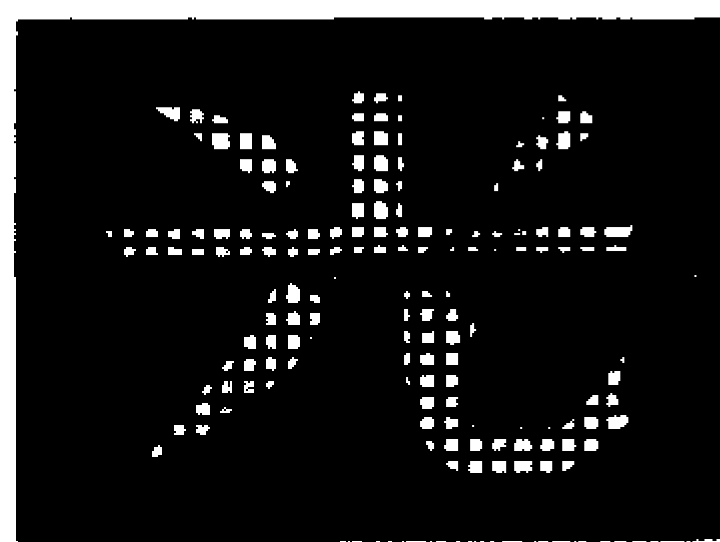


图 20－6

1. 将一个正交铜丝网和纸上透明的字重叠在一起，作为成像系统的物，铜丝网格密度约为 10 条/mm(或用丝绢)，而字的笔划粗细约为毫米数量级，放大像如图 20－6 所示.

2. 光路布置如图 20－7 所示. 用短焦距的扩束透镜 L_1 和准直透镜 L_2 组成倒装的望远系统，以获得截面较宽的平行光束照明物体.

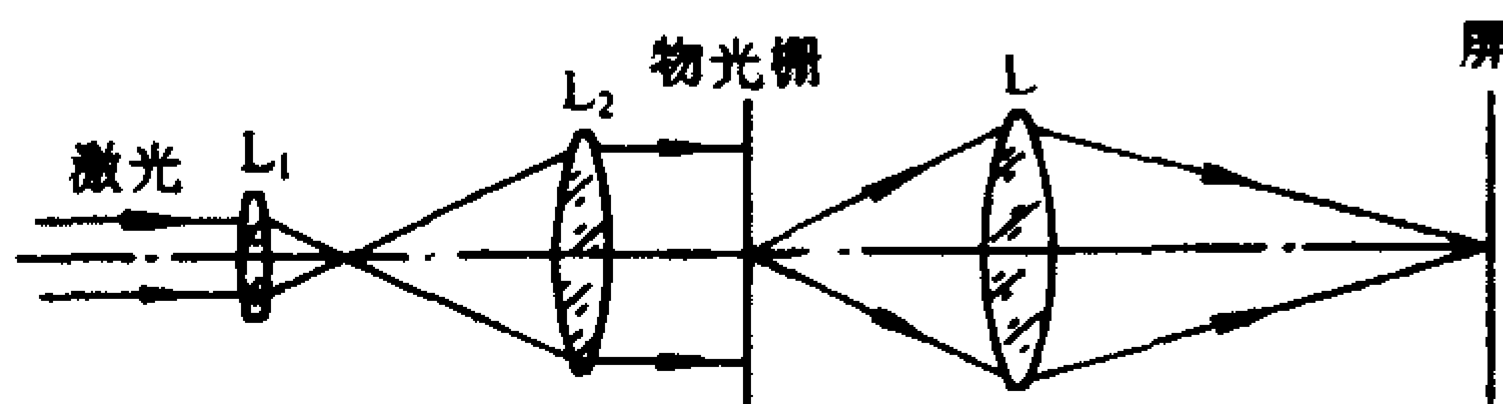


图 20－7

如透镜 L_1 的焦距为 f_1，L_2 的焦距为 f_2，当调节 L_1 和 L_2 共

焦时,其输出平行光束的截面将增大 $M=f_2/f_1$ 倍.

先调节两透镜共轴,其次改变 L_2 位置用白屏检查,直至不论白屏移至何处,屏上光斑的大小没有变化,此时,从 L_2 输出的即为平行光束.

3. 用扩展后的激光束照明物体,以透镜 L 将此物成像于较远处的屏上,则屏上出现带有网格的字样. 由于网格为一周期性的空间函数,它的频谱是有规律排列的分立的点阵,而字迹是一个非周期性的低频信号,它的频谱就是连续的.

4. 将一个可变圆孔光阑放在 L 的像方焦平面上,逐步缩小光阑,直到除了光轴上一个光点以外,其它分立光点均被挡住,此时像上不再有网格,但是字迹仍然保留下来.

试从空间滤波的概念解释上述现象.

四、空间滤波实验(二):θ 调制

θ 调制就是以不同取向的光栅调制物平面上的不同部位,经过空间滤波以后,使像平面上各相应部位呈现不同的灰度(用单色光照明)或不同的色彩(用白光照明). 下面进行 θ 彩色调制实验.

1. 用全息照相方法制作一个 θ 调制的图像,即由不同取向的光栅组成的图像,如图 20-8(a)所示. 图中的草地、房子、天空分别由三个不同取向的光栅组成(光栅条纹数约为 100 条/mm),三个光栅的取向各相差 60°.

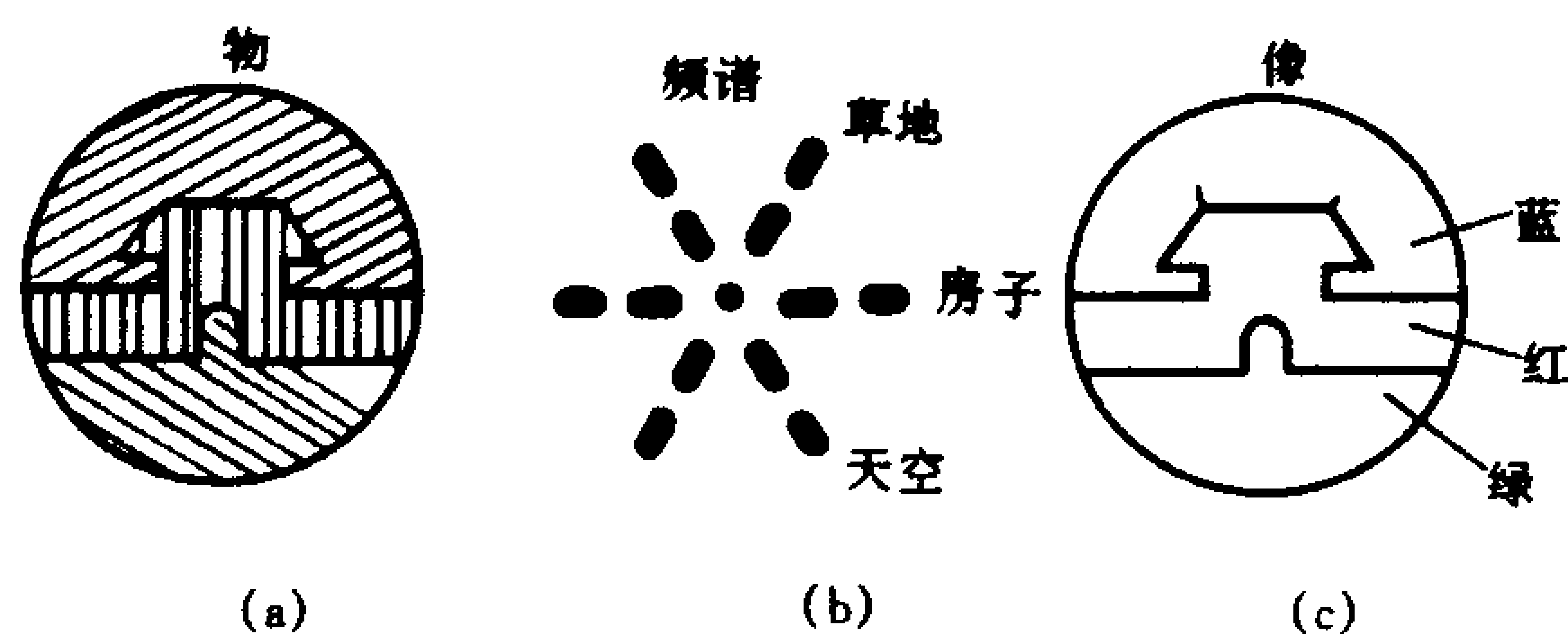


图 20-8

2. 以溴钨灯 S 为光源，上述 θ 调制的图像为物，按图 20－9 在光具座上布置光路，L_1 为聚光镜，物 P 就放在 L_1 后面，成像透镜 L_2 放在接近于傅氏面 P_2（即光源 S 的共轭像平面）的位置，它将物成实像在屏上．这时在 P_2 平面上可以看到光栅的彩色衍射图，如图 20－8(b)所示．三个不同取向的衍射极大值是相应于不同取向的光栅，也就是分别相应于图像中的天空、房子和草地．此时这些衍射极大值除了 0 级没有色散以外，一级、二级、……都有色散．波长短的蓝光具有较小的衍射角，其次为绿光，而红光的衍射角最大．

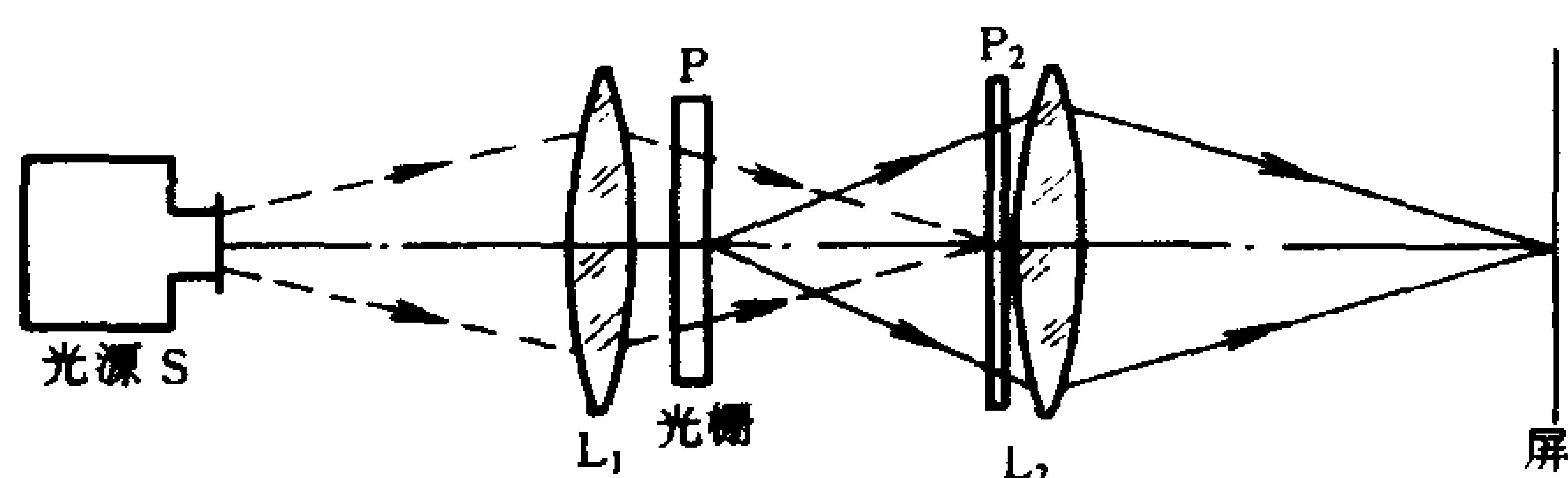


图 20－9

3. 用小孔（或细缝）作空间滤波器．调节一对小孔在同一彩色衍射图上的位置，仅使相应于草地的一级衍射图上的绿光能透过 P_2 面．用同样办法，仅使相应于房子的一级衍射的红光和相应于天空部分的一级衍射的蓝光能透过 P_2 面．这时在屏上将出现蓝色的天空、红色的房子和绿色的草地的彩色图像．

4. 重新调整各滤波小孔在相应彩色衍射图上的位置，观察像面上图像假彩色的变化．

复习思考题

1. 如何从阿贝成像原理来理解显微镜或望远镜的分辨率受限制的原因？能不能用增加放大率的办法来提高其分辨率？

2. 在解释阿贝原理实验（二）的步骤 5 中，用一光阑挡住二维光点阵中的 0 级光点，网格图像的强度分布为什么会发生反转变化？试解释之．

3. 如果有一张细节比较模糊的照片，能否通过空间滤波的方法加以改善？

4. 在 θ 调制实验中，物面上没有光栅的地方，原都是透明的，但像面上相应的部位却是暗黑的，为什么？

5. 要用钠光或白光进行阿贝实验，有何困难？实验光路应作何变动？

实验二十一　光源色坐标的测定

目的

1. 了解色度测量的基本概念；
2. 学会测定光源光谱的相对能量分布，以确定其色度坐标．

仪器和用具

反射式棱镜单色仪，光电探测器（蓝敏硅光电池），移测显微镜，灵敏电流计（$R_g<50\ \Omega$），标准光源（钨带灯），透镜，直流稳流电源，待测光源，汞灯（GGQ80）．

原理

光源的颜色一般包含两方面的意思，一是指人眼直接观察光源时主观感受的颜色，称为光源的色表，如钨丝灯看上去白里带黄，高压汞灯发光时白里带青，钠灯光色一片金黄，而氙灯发光则接近日光．另一层意思是指光源照射到物体时所产生的客观效果，如果各色物体受照的效果和黑体受照射时相同，则称该光源的显色性（传色性）好．如拍摄彩色电影，就需用显色性好的光源，因此光源的色表和显色性是除发光效率之外的又一个重要的特征．光源发光的颜色原则上可以用光谱能量分布表示，光谱能量分布相同的光源其颜色也相同，而看上去颜色相同的光源，其光谱能量分布可能相差很大．

对人眼颜色视觉的研究表明，人眼视网膜上有三种不同光谱灵敏度的接受器，其最大值分别位于红光、绿光和蓝光区域，如图21－1所示．这三种接受器的相对灵敏度之和就是人眼的视见函数 $V(\lambda)$．上述三基色理论认为：红、绿、蓝是三种基本的颜色，任何一种颜色均可由这三种基色按一定比例混合而获得．国际上公

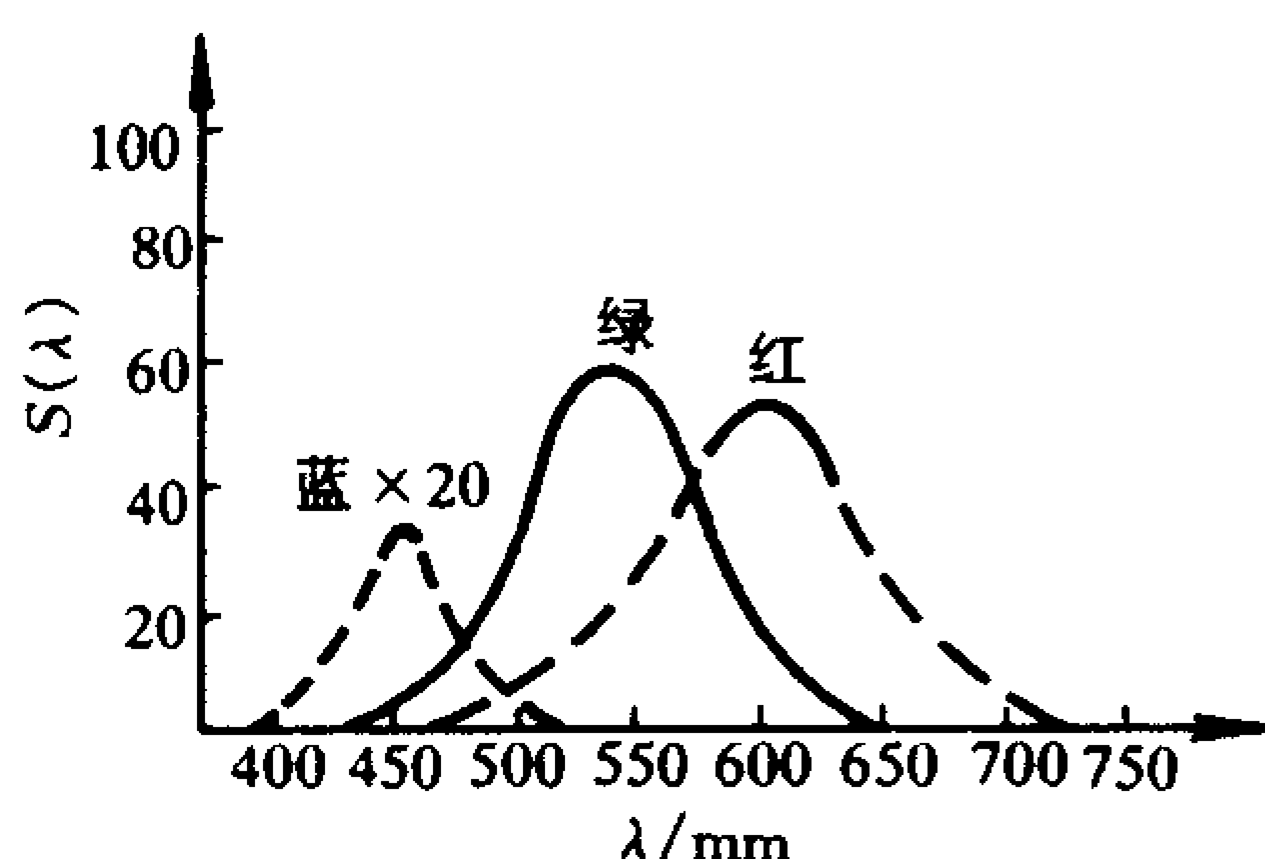


图 21－1

认的三基色波长为:700.0 nm(红光 R)、546.1 nm(绿光 G)和 435.8 nm(蓝光 B),后二色是汞的两条强谱线的波长. 如果把 $(R)(G)(B)$三基色光通量的流明数按 1:4.590 7:0.060 1 为单位比例混合,即可获得 5.650 8 lm 的等能量白光. 因此称$(R)(G)(B)$为 RGB 表色系统的基色量. 而任一色光的光通量 Φ 均可写成

$$\Phi = R(R) + G(G) + B(B) \qquad (21-1)$$

R、G、B 为混色比例,它们既决定了光源的颜色,又决定了辐射光通量的数值.

色度学中常用色坐标表示颜色,RGB 表色系统的色坐标 r、g、b 的定义为

$$\begin{cases} r = R/(R+G+B) \\ g = G/(R+G+B) \\ b = B/(R+G+B) \end{cases} \qquad (21-2)$$

并有
$$r + g + b = 1$$

但为了获得某种色光,三色系数 R、G、B 中某个系数有时必须取负值,给计算带来很大的不便. 所以国际照明委员会(C. I. E.)又采用了新的 XYZ 表色系统,用虚设的基色量$[X][Y][Z]$替代$[R][G][B]$,三色系数 X、Y、Z(又称三色刺激值)和 R、G、B 之间有换算关系式:

$$\begin{cases} X = 2.768\,9R + 1.731\,7G + 1.130\,2B \\ Y = 1.000\,0R + 4.590\,7G + 0.060\,1B \\ Z = 0.000\,0R + 0.056\,3G + 5.594\,3B \end{cases} \tag{21-3}$$

XYZ 表色系统中的色坐标为

$$\begin{cases} x = X/(X + Y + Z) \\ y = Y/(X + Y + Z) \\ z = Z/(X + Y + Z) \end{cases} \tag{21-4}$$

显然，$$x + y + z = 1$$

因此，由式(21－3)和式(21－4)，不难得出 x、y 与 r、g 之间的关系为

$$\begin{cases} x = \dfrac{1.130\,2 + 1.638\,7r + 0.621\,5g}{6.784\,6 - 3.015\,7r - 0.385\,7g} \\ y = \dfrac{0.060\,1 + 0.939\,9r + 4.530\,6g}{6.784\,6 - 3.015\,7r - 0.385\,7g} \end{cases} \tag{21-5}$$

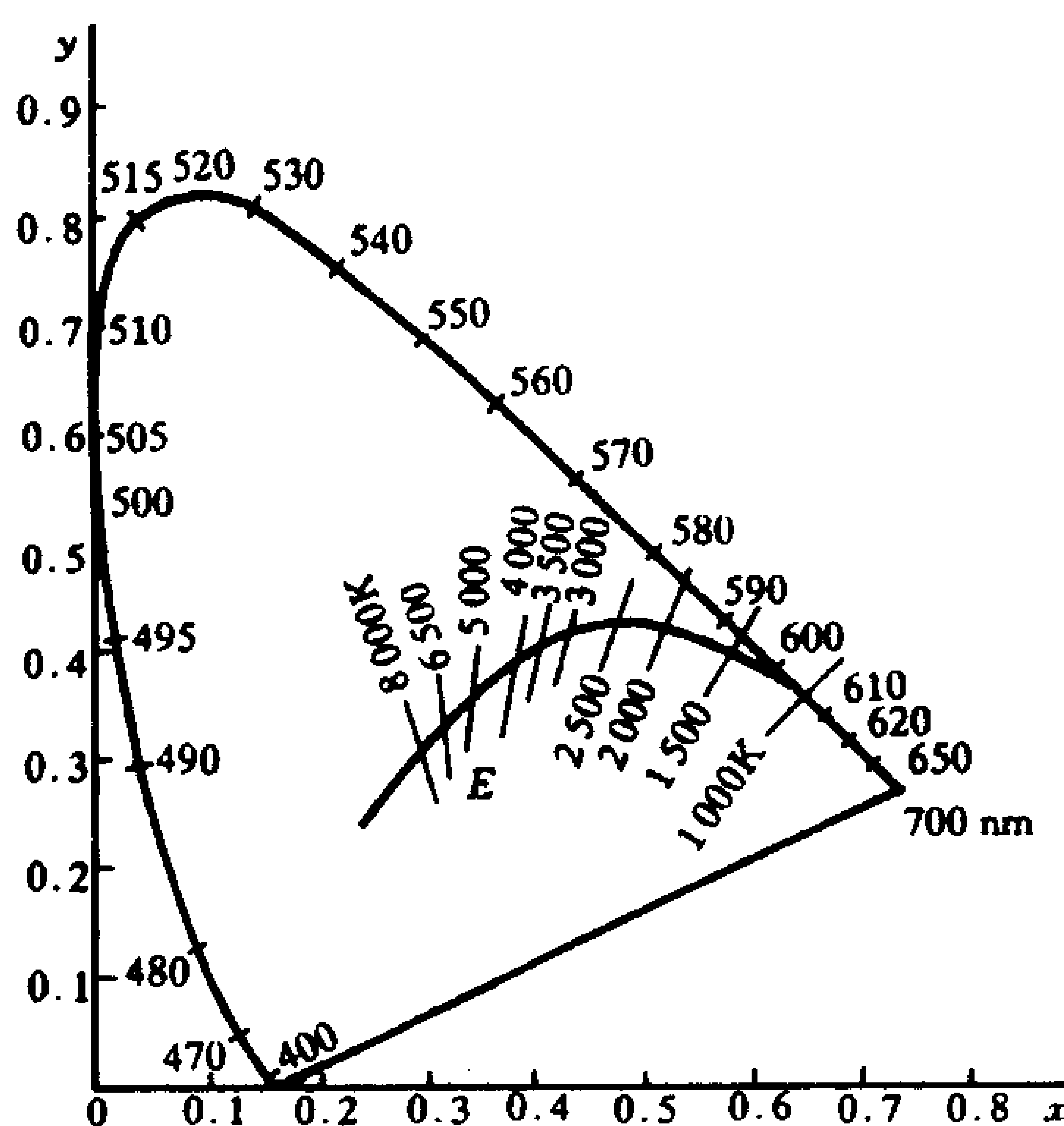


图 21－2

图 21－2 就是一个典型的 $x-y$ 色度坐标图，舌形曲线上各

点的位置代表不同波长的单色光，图中 E 点的邻域为白光区，一条弯曲线代表不同温度下黑体辐射 x、y 值的轨迹. 如已知 RGB 表色系统的色坐标 r、g，便可运用式(21－5)求得 XYZ 表色系统的色坐标 x、y.

若以 $\Phi(\lambda)$ 表示波长为 λ，辐射功率为 $L(\lambda)$ 的光通量，则有

$$\Phi = X(X) + Y(Y) + Z(Z)$$

和
$$\mathrm{d}\Phi(\lambda) = K_{\mathrm{m}} V(\lambda) L(\lambda) \mathrm{d}\lambda$$

式中 K_{m} 为比例系数，其值为 680 lm/W，若令视见函数 $V(\lambda) = \bar{x}_\lambda(X) + \bar{y}_\lambda(Y) + \bar{z}_\lambda(Z)$，而 $\bar{x}_\lambda$、$\bar{y}_\lambda$、$\bar{z}_\lambda$ 称为 XYZ 表色系统中等能量白光的三色分布系数，对应于不同波长的 $\bar{x}_\lambda$、$\bar{y}_\lambda$、$\bar{z}_\lambda$ 的数值列于表 21－1 中.

表 21－1　XYZ 表色系统中等能量白光的三色分布系数值

波长/nm	$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$	波长/nm	$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$
400	0.014 3	0.000 4	0.067 9	600	1.062 2	0.631 0	0.000 8
410	0.043 5	0.001 2	0.207 4	610	1.002 6	0.503 0	0.000 3
420	0.134 4	0.004 0	0.645 6	620	0.854 4	0.381 0	0.000 2
430	0.283 9	0.011 6	1.385 6	630	0.642 4	0.265 0	0.000 0
440	0.348 3	0.023 0	1.747 1	640	0.447 9	0.175 0	0.000 0
450	0.336 2	0.038 0	1.772 1	650	0.283 5	0.107 0	0.000 0
460	0.290 8	0.060 0	1.669 2	660	0.164 9	0.061 0	0.000 0
470	0.195 4	0.091 0	1.287 6	670	0.087 4	0.032 0	0.000 0
480	0.095 6	0.139 0	0.813 0	680	0.046 8	0.017 0	0.000 0
490	0.032 0	0.208 0	0.465 2	690	0.022 7	0.008 2	0.000 0
500	0.004 9	0.323 0	0.272 0	700	0.011 4	0.004 1	0.000 0
510	0.009 3	0.503 0	0.158 2	710	0.005 8	0.002 1	0.000 0
520	0.063 3	0.710 0	0.078 2	720	0.002 9	0.001 0	0.000 0
530	0.165 5	0.862 0	0.042 2	730	0.001 4	0.000 5	0.000 0
540	0.290 4	0.954 0	0.020 3	740	0.000 7	0.000 3	0.000 0
550	0.433 4	0.995 0	0.008 7	750	0.000 3	0.000 1	0.000 0
560	0.594 5	0.995 0	0.003 9	760	0.000 2	0.000 1	0.000 0
570	0.762 1	0.952 0	0.002 1	770	0.000 1	0.000 0	0.000 0
580	0.916 3	0.870 0	0.001 7	780	0.000 0	0.000 0	0.000 0
590	1.026 3	0.757 0	0.001 1				

因此
$$\begin{cases} X = K_{\mathrm{m}}\int L(\lambda)\bar{x}_{\lambda}\mathrm{d}\lambda \\ Y = K_{\mathrm{m}}\int L(\lambda)\bar{y}_{\lambda}\mathrm{d}\lambda \\ Z = K_{\mathrm{m}}\int L(\lambda)\bar{z}_{\lambda}\mathrm{d}\lambda \end{cases} \tag{21-6}$$

由于一般光源(黑体除外)的光谱相对能量分布很难写出显函数形式,加之在实际分光测量中,测得的 $L(\lambda)$ 只能是在 $\Delta\lambda$ 范围内的平均值,因此为简化运算,一般采用等光谱间隔累加的方法,即

$$\begin{cases} X = \Sigma L(\lambda)\bar{x}_{\lambda}\Delta\lambda \\ Y = \Sigma L(\lambda)\bar{y}_{\lambda}\Delta\lambda \\ Z = \Sigma L(\lambda)\bar{z}_{\lambda}\Delta\lambda \end{cases} \tag{21-7}$$

但 $x-y$ 色坐标图有一个严重的缺点,即图上不同部分相等间隔并不相应于人眼视觉相同的颜色差别. 为此,1960 年又采用了 CIE"ucs"均匀表色系统,在这个系统中色坐标 u、v 与 x、y 之间的关系为

$$\begin{cases} u = 2x/(1.5 - x + 6y) \\ v = 3y/(1.5 - x + 6y) \end{cases} \tag{21-8}$$

所以,测定了光源的光谱分布 $L(\lambda)$,从表 21-1 查知不同波长的三色分布系数 $\bar{x}_{\lambda}$、$\bar{y}_{\lambda}$、$\bar{z}_{\lambda}$,便可由式(21-7)计算出三色刺激值 X、Y、Z,进而应用式(21-4)或式(21-8)计算出光源的色坐标 x,y 或 u,v.

实验内容

1. 绘制单色仪定标曲线

为进行分光测量,必须调节使用单色仪,并绘制单色仪的定标曲线[即鼓轮读数(T)-波长(λ)曲线],以确定所需输出的各单色光波长.

棱镜单色仪的结构和定标方法参见实验七的有关内容. 本实验装置如图 21-3 所示.

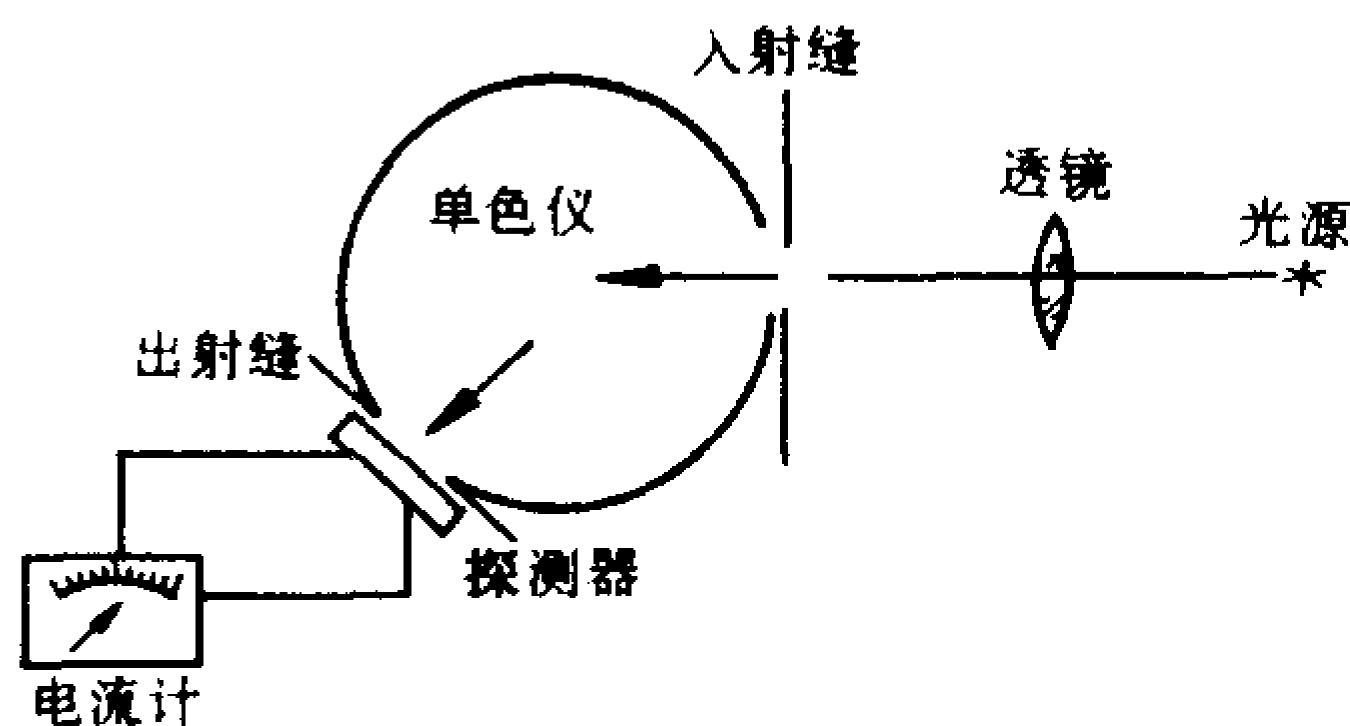


图 21－3

2. 测定单色仪的色散曲线

因单色仪输出的光谱宽度 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda=(a_1+a_2)/(\mathrm{d}l/\mathrm{d}\lambda) \qquad (21-9)$$

式中 a_1,a_2 分别为单色仪入射缝和出射缝的宽度，为确定 $\Delta\lambda$，必须测定单色仪的色散曲线$\left(\text{即}\dfrac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}\lambda}-\bar{\lambda}\ \text{曲线}\right)$.

(1) 将单色仪出射缝宽度加大，使汞灯相近的光谱线对清晰地呈现在移测显微镜的视场中.

(2) 选取下列光谱线对，用移测显微镜测量各线对间的距离 $\mathrm{d}l$，计算对应于线对平均波长 $\bar{\lambda}$ 的线色散，作出单色仪的色散曲线($\mathrm{d}l/\mathrm{d}\lambda$ 与 $\bar{\lambda}$ 的关系曲线).

λ_1/nm	404.7	434.7	491.6	577.0	607.3	671.6
λ_2/nm	407.8	435.8	496.0	579.1	612.4	690.7

3. 测定光源相对光谱能量分布

(1) 为保证等光谱间隔能量的测量，本实验中可选取 $a_1=a_2$，$\Delta\lambda=20$ nm，由色散曲线查知不同波长的 $\mathrm{d}l/\mathrm{d}\lambda$ 值，应用式(21－9)算出对应的缝宽值，列表备用.

(2) 做单色仪入射缝宽和出射缝宽读数零点的校正.

(3) 将光电探测器装在单色仪的出射缝处，用灵敏电流计记录光电流 $i(\lambda)$，若探测器工作在线性区，则 $i(\lambda)$与 $L(\lambda)$成线性关系.

(4) 点亮待测光源，待稳定后，转动单色仪读数鼓轮，在可见光范围内，依次每隔 20 nm，（即 $\bar{\lambda}$ 依次取 410 nm，430 nm，450 nm，…）测试 $i(\lambda)$ 一次. 注意每次均需将单色仪缝宽调节到所需数值，以确保等光谱间隔输出.

(5) 重复测量三次，取平均值.

4. 标准灯光谱能量相对分布的测量

(1) 点亮钨带标准灯，用直流稳流电源将灯温升至 T(K)，为计算方便，本实验中取 $T=2\,000$ K，可由说明书查知标准灯的工作电流.

(2) 用普朗克公式

$$L_B(\lambda)=k\lambda^{-5}(e^{c_2/\lambda T}-1)^{-1} \tag{21-10}$$

计算温度为 T 的黑体光谱能量的相对分布，式中可令 $k=1$，$c_2=1.438\,5\times10^{-2}$ K·m.

(3) 应用光谱发射率公式

$$L_S(\lambda)=\varepsilon(\lambda,T)L_B(\lambda) \tag{21-11}$$

计算标准灯的光谱能量的相对分布 $L_S(\lambda)$.

不同温度时钨的光谱发射率 $\varepsilon(\lambda,T)$ 均可查知，当温度 $T=2\,000$ K时，$\varepsilon(\lambda)$ 的数值参见表 21－2，根据所列数据，作 $\varepsilon(\lambda)-\lambda$ 曲线，备用.

表 21－2

λ/nm	400	450	500	550	600	650	700
$\varepsilon(\lambda)$	0.474	0.469	0.462	0.455	0.449	0.442	0.436

(4) 用同一探测器测定标准灯照明的光电流 $i_S(\lambda)$，则由 $L(\lambda)=\dfrac{i(\lambda)}{i_S(\lambda)}L_S(\lambda)$ 可计算出待测光源光谱能量的相对分布.

(5) 重复测量几次，取平均值.

5. 运用公式(21－7)和表 21－1，将 X、Y、Z 计算值列表，以求出色坐标 x、y 值，并换算成 u、v 值.

[建议]：本实验运算较繁，可应用微机，自行编制程序，输入数

据，计算并打印出实验结果.

几点说明

1. 光度测量时，需要用光强标准灯与光通量标准灯，和待测光源进行比较；同样在测量光源光谱相对能量分布时，也需要用光谱能量标准灯作比较，钨带灯就是常用的标准光源之一.

钨带灯是将钨带封装在硬质玻壳内，通以电流加热而使之发光的光源，钨带狭长，宽约 2 mm，厚约 0.05 mm. 对用于紫外区的标准钨带灯，则在泡壁上开有石英窗，让紫外线通过.

钨带的电阻很小，因此钨带灯大多是低压大电流的，一般使用直流稳流电源供电；通电加热后，钨带的温度分布并不均匀，距两端近电极支架处温度较低，中间温度较高，测量时要选取钨带中部温度均匀处的辐射，钨带灯工作时，温度较高，要防止搬移震动. 钨带灯的工作温度要按工作电流进行定标后方可用以测量，定标的方法可以与黑体辐射比较，或用光学高温计测温后，用式(21－11)计算.

2. 如果测量仅在可见光区，且温度较低($T<3\ 400$ K)，则 $\lambda T \ll c_2$，式(21－10)可简化成

$$L_B(\lambda)=k\lambda^{-5}e^{-c_2/\lambda T} \qquad (21-12)$$

本实验中的测量即属此种条件，故可直接应用式(21－12)简化计算.

3. 用光电探测器检测光信号时，探测器产生的光电流 $i(\lambda)$ 与待测光信号 $L(\lambda)$、光探测器的光谱灵敏度 $S(\lambda)$、单色仪的光谱透过率 $T(\lambda)$和出射光谱宽度 $\Delta\lambda$ 之间的关系为

$$i(\lambda)=kL(\lambda)S(\lambda)T(\lambda)\Delta\lambda \qquad (21-13)$$

式中 k 是与波长无关的常量. 因此，在直接进行光谱能量测量时，必须知道光探测器的灵敏度 $S(\lambda)$和单色仪光谱透过率 $T(\lambda)$对测量的影响. 但在使用标准光源进行比较测量时，明显有下列关系式存在：

$$i(\lambda)/i_S(\lambda)=L(\lambda)/L_S(\lambda) \tag{21-14}$$

从而可使测量简化.

另外,探测器要有良好的线性响应,必须选用低电阻的显示仪表,采用补偿测量电路或选择使用有较宽线性工作区的光探测器.

4. 测量时,单色仪的读数鼓轮、狭缝的微动螺旋,移测显微镜的传动丝杆均必须保持单方向移动,以防止回程误差.

复习思考题

1. 讨论式(21-11)的应用条件.

2. 讨论光电池的线性和光谱相对灵敏度、单色仪的狭缝宽度和光谱透过率对测量的影响及本实验的处理方法.

3. 测量光源光谱相对能量的分布为什么要采用等光谱间隔?如待测系统光谱中包含分立的谱线时,应该怎样测定三色刺激值 XYZ?

4. 讨论光源实际温度与其色温之间的关系,如何应用本实验方法测量光源的色温?

实验二十二　导光纤维

目的

1. 观察导光纤维的传光现象；

2. 了解导光纤维数值孔径的意义及测定方法；

3. 了解光波通过媒质后强度衰减的规律，及测定导光纤维的衰减系数的方法.

仪器和用具

He－Ne激光器，短焦距透镜，导光纤维束（两根），积分球或功率计（光电池及灵敏电流计），显微镜，光阑，支架.

原理

导光纤维是一种利用全反射原理，使光线和图像能够沿着弯曲路径从一端传送到另一端的光学元件. 导光纤维的结构如图22－1所示，每根纤维的直径约为几个微米到几十个微米，分内外两层，内层是高折射率 n_2 材料的玻璃纤维芯，外层是低折射率 n_1 材料的玻璃或塑料等. 纤维芯料和外层材料之间形成良好的光学界面. 这样，当光线以入射角 i_0 从折射率为 n_0 的介质投射到导光纤维的端面上，经折射进入导光纤维后，将以角 i 入射到芯料和

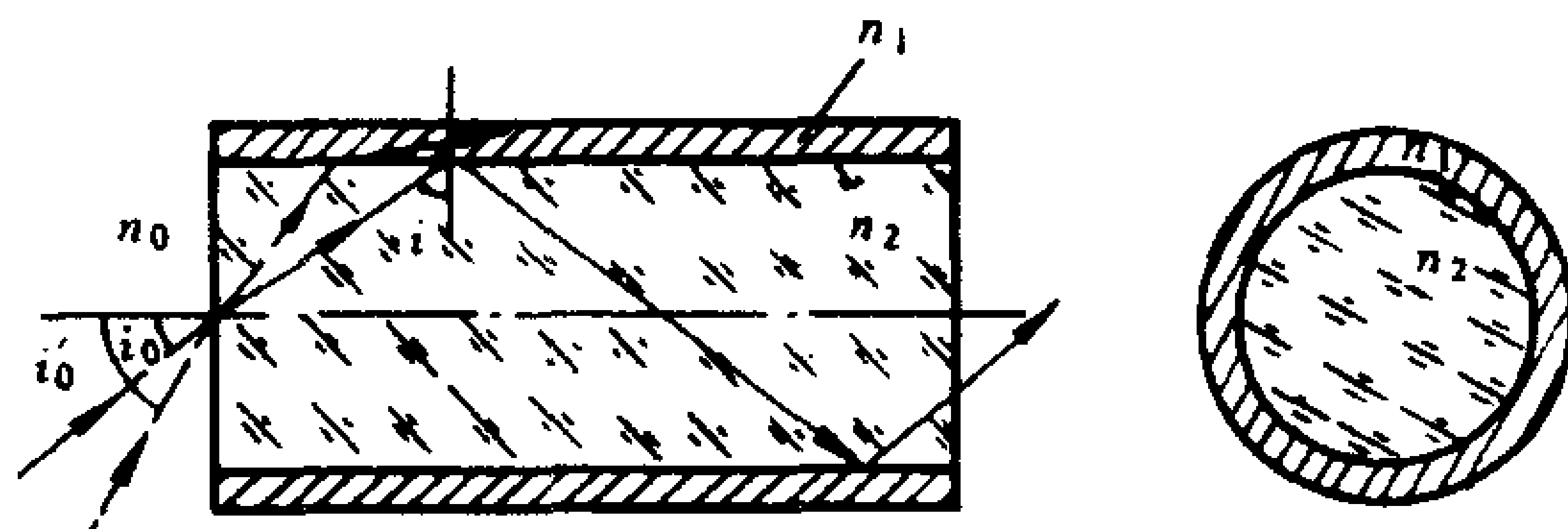


图 22－1

外层材料之间的界面上．只要 i_0 选择适当，即

$$i_0 < \arcsin\left(\frac{1}{n_0}\sqrt{n_2^2 - n_1^2}\right) \qquad (22-1)$$

时，角 i 将大于临界角 i_c，这样，入射的光线将在界面上发生全发射．

如果导光纤维是均匀的圆柱状细丝，则全反射的光线将以同样的角度射到对面的界面上，并发生第二次全反射；依此类推，光线就能够在导光纤维内连续发生若干次（决定于纤维的长度、直径和入射角的大小）全反射后，从一端传送到另一端，且以与入射角相同的角度 i_0 射出导光纤维．

如果把一束导光纤维紧密地捆在一起，在两端把纤维有规则的排列起来，用环氧树脂胶合，再把端面切平并进行抛光，就形成了导光纤维束，这种仅限于传递光能的纤维束称为传光束．既能传递光能又能传递图像的纤维束称为传像束．

导光纤维很细，质地柔软．由许多相同的导光纤维组成的导光纤维束，具有可弯曲、传送过程光能损失小、数值孔径大、分辨率高和结构简单、使用方便等特点，广泛应用于电子光学、高速摄影、医疗器械、科学实验和工业生产等方面．

导光纤维的基本光学特性参量有数值孔径、透射率和分辨率．

1．数值孔径

和显微镜一样，称 $n_0\sin i_0$ 为导光纤维的数值孔径，以 N_A 表示[①]，由式(22－1)得

$$N_A = n_0\sin i_0 = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \qquad (22-2)$$

从上式可以看出，导光纤维中芯料介质的折射率 n_2 越大，包层介质的折射率 n_1 越小，则数值孔径就越大，入射角 i_0 也越大．所以数值孔径是表征导光纤维集光能力的参量．这是因为，入射光束

① 过去习惯上用 N. A. 表示数值孔径，现因国标要求量的符号要用单个的斜体字母表示，故改用 N_A 表示数值孔径．

的 i_0 数值越大,则能进入光纤中传递的光通量越多.

2. 透射率 $T(\lambda)$

透射率 T 是表示导光纤维透光性能的重要参数,它的定义和光学材料的透射率定义相同,即

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \tag{22-3}$$

式中 I_0、I 分别表示输入导光纤维和从导光纤维输出的光强,导光纤维的透射率是光波波长的函数,$T(\lambda)$与 λ 的关系曲线称为光谱透射曲线.

如应用单色光照明,在实际使用中,还由于下述原因使得光通过导光纤维后,强度要发生一定的衰减.

(1) 端面的反射损失

当入射光从空气射到导光纤维端面上时,不管入射角多大,总有一部分光被反射. 入射角不同,被反射的光强也不同. 入射角越小,端面的反射损失就越小. 设端面的光强反射率为 $R(i_0)$,则考虑两端面的反射损失后,导光纤维所传送的光强比 $t_1=[1-R(i_0)]^2$.

(2) 界面的全反射损失

设 $\alpha(i)$为导光纤维芯料与外层材料界面上的全反射率. 在理想情况下,$\alpha(i)=1$,这时,反射是完全的,不存在全反射损失. 但由于外层材料的吸收、界面不是理想的光学接触、衍射作用和边界波的穿透等影响,使得 $\alpha(i)$小于 1. 显然,光束在纤维内反射次数愈多,全反射损失也愈大. 如令 $A(i)$表示全反射的损失率,则 $\alpha(i)=1-A(i)$;如果光束从导光纤维一端传送到另一端所经过的全反射次数为 n,则考虑界面全反射损失后,导光纤维传送的光强比 $t_2=[1-A(i)]^n$,它与光波波长及纤维排列的空间特性有关.

以上仅对某一特定方向的入射光线而言. 如果入射光线有一定的角分布,则关系将是很复杂的;但从大量实验事实知道,可以根据不同条件作近似的处理.

(3) 导光纤维芯料的吸收和散射损失

任何物质对光都有一定的吸收和散射作用，其大小可用衰减系数表示. 设 β 为导光纤维芯料的衰减系数(如果芯料质地纯洁无杂质，略去其散射损失，β 就是芯料的吸收系数)，L 为导光纤维的长度，则考虑到芯料的吸收和散射后，通过导光纤维透射的光强比 $t_3 = e^{-\beta L}$.

综合考虑上述三种主要因素所造成的光能损失，则当光强为 I_0 的入射光束经过长度为 L 的导光纤维后，透射光强可近似表示为

$$I = I_0 t_1 t_2 t_3 = I_0(1 - R)^2(1 - A)^n e^{-\beta L} \quad (22-4)$$

为了简便，上式省略了 i、i_0 的符号. 由上式可知，透过导光纤维的光强不仅决定于光纤芯料的质地纯洁，还与光纤加工的工艺密切相关.

3. 分辨本领

用导光纤维束传递图像时，纤维束中的每一根纤维分别传递一个图像单元，而纤维束输出端图像的质量则取决于导光纤维的可以分辨的两个像元的最小距离，称为导光纤维的分辨率. 可分辨的距离越小，分辨本领越大，导光纤维束传递图像的性能越好，最后得到的图像就越清晰. 影响导光纤维束分辨本领的因素有：每根纤维直径的大小，纤维排列方法以及相邻二纤维之间的距离，此外与使用的情况也有关.

本实验因只使用传光束，测定其数值孔径和衰减系数，对传像束不进行分辨本领的测定.

实验内容

一、观察导光纤维的传光现象

1. 用透明的有机玻璃细棒弯成一定几何形状的导光棒，并将两端面磨平、抛光. 让氦氖激光束以不大的角度从一端面射入. 由于光线在有机玻璃棒内的全反射和散射，因此可以清楚地看到光在

弯曲玻璃棒内的传播径迹，这和导光纤维内的传光作用是一致的.

2. 用导光纤维代替有机玻璃棒，让氦氖激光束以不大的角度从一端面射入，在另一端面观察其传光的实际效果.

二、测定导光纤维的数值孔径

1. 将照明光源 S、准直管 C、导光纤维 F 和显微镜 M 按图 22－2 所示放好，导光纤维的两个端面固定安装在支架上，支架可绕铅直轴转动，以改变入射角，转角的大小用刻度盘 R 读出，点光源发出的光经准直管后成为平行光束，照射在待测导光纤维的一个端面上，在另一端面用生物显微镜（放大倍数为 300× 以上）进行观察. 将显微镜对导光纤维的出光端面进行调焦，使视场中呈现端面的清晰像. 固定显微镜与导光纤维的相对位置，并可一起绕轴转动.

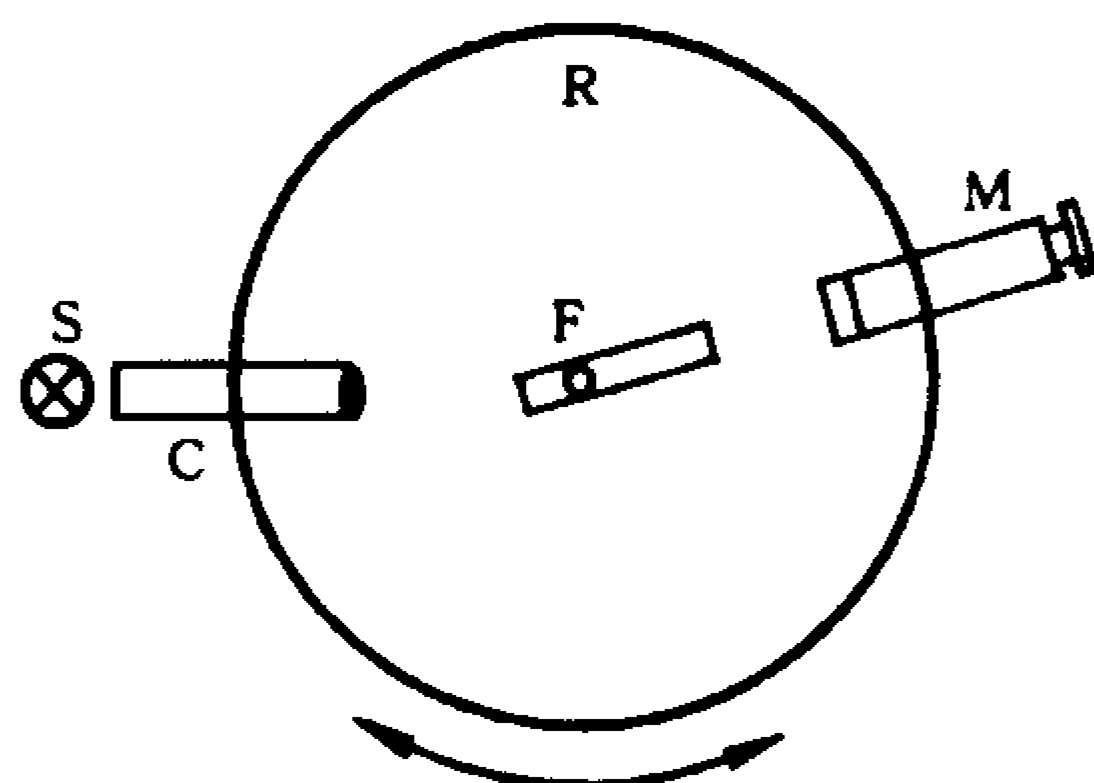


图 22－2

2. 决定临界入射角 i_0

(1) 令平行光束近于垂直入射于导光纤维的进光端面，由于入射角 $i<i_0$，显微镜视场中应观察到芯料比包层明亮，沿顺时针方向转动导光纤维的旋转支架，逐渐增大入射角，当芯料与包层照明的亮度一样时，记录支架的相对位置读数 T_1.

(2) 再沿逆时针方向旋转导光纤维支架，在端面法线的另一侧，同样观察当芯料和包层视场照明一样时，记录其位置读数 T_2.

(3) 由 $i_0=\frac{1}{2}(T_2-T_1)$计算光纤的临界入射角 i_0，重复几次，取其平均值，代入式(22－2)即可求出待测光纤的数值孔径.

由于当 $i>i_0$ 时，显微镜视场中将观察到包层比芯料明亮，所以可以根据视场中明暗对比的变化来判断 i_0 的取值，以提高测量的精度.

三、测定导光纤维的衰减系数 β'

1. 为了通过测定透射光强而测定衰减系数 β，必须设法消除端面反射和全反射损失的影响. 为此，让同样角分布的激光束分别通过长度为 L_1 和 L_2 的两根材料相同的导光纤维，测出其透射光强

$$I_1 = I_0(1-R)^2(1-A)^n e^{-\beta L_1} \qquad (22-5)$$

和

$$I_2 = I_0(1-R)^2(1-A)^{n'} e^{-\beta L_2} \qquad (22-6)$$

如果 L_1 和 L_2 相差不多，光束在两根纤维中的全反射次数相近，则 $n\approx n'$. 于是，由式(22－5)除以式(22－6)得

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{-\beta(L_1-L_2)} = e^{-\beta\Delta L}. \qquad (22-7)$$

式中 $\Delta L=L_1-L_2$ 为两根导光纤维的长度差，两边取自然对数，即得导光纤维的衰减系数为

$$\beta = \frac{\ln I_2-\ln I_1}{\Delta L} \qquad (22-8)$$

实用上，常以下式表示导光纤维的衰减系数：

$$\beta' = \frac{10\lg(I_2/I_1)}{\Delta L} \qquad (22-9)$$

不难看出 β 和 β' 的关系是

$$\beta=\frac{\beta'}{10\lg e}=\frac{\beta'}{4.342\,9}$$

[因为 $\ln b=\lg b/\lg e$，而 $\lg e=0.434\,29$.]如果长度 $L(\Delta L)$以米

为单位，则 β' 的单位为分贝每米(dB/m).

2. 如图 22－3 所示安排各光学元件. 点亮激光器约半小时，待稳定后，让激光束经短焦距透镜，以不大的入射角照射到固定光阑后面长度为 L_1 的导光纤维的端面上，用积分球(或功率计)测定其透射光强 I_1(即用灵敏电流计显示光电流的偏转格值)，并记录之.

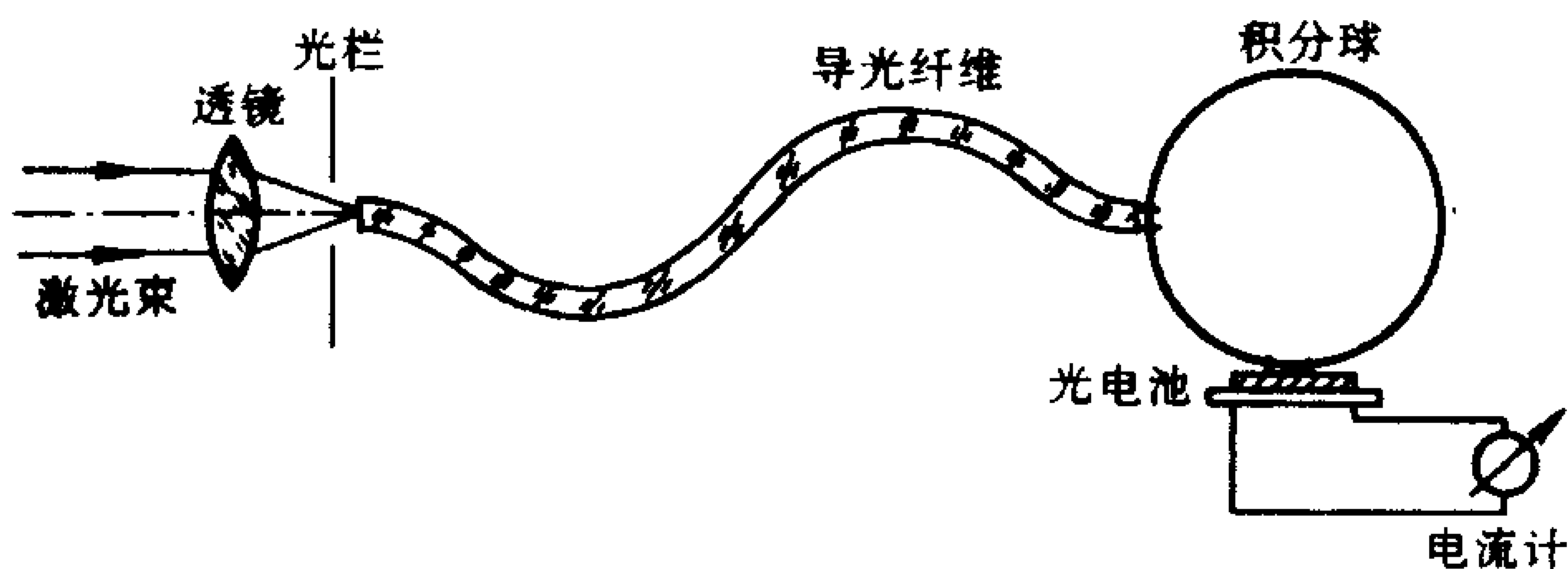


图 22－3

3. 保持激光管、透镜和光阑的相对位置不变，换以另一长度为 L_2 的材料相同的导光纤维，同上法测定其透射光强 I_2. 将 I_1、I_2 的测定值代入式(22－9)计算出衰减系数 β'.

测量中应注意以下几点：

(1) 长度不同的两根导光纤维必须从同一纤维束上截取，以保持其内部结构和特性完全一样.

(2) 两根导光纤维的进光端面和出光端面必须具有相近的物理状态，以确保两次测试中端面反射的影响相同.

(3) 在测定 I_1、I_2 的过程中，应尽可能地使激光器的输出功率保持不变；否则，须加一监控装置以修正其测定值.

(4) 如用功率计测定透射光强时，必须使它尽量靠近导光纤维的出光端面，以免引起较大的测量误差.

复习思考题

1. 试讨论用有机玻璃棒和导光纤维传光的实际效果的异同.

2. 运用图 22－3 所示装置可否测定端面的反射损失？应该如何测量？

3. 怎样测定导光纤维的光谱透射曲线？

实验二十三　磁光效应和磁光调制

目的

1. 观察石榴石单晶薄膜磁致旋光现象，测定法拉第旋光角 θ 与磁场强度 B 的关系曲线；

2. 了解磁光调制器的工作原理，观察磁光调制现象，并学会测定石榴石单晶薄膜制成的磁光调制器的特征参量.

仪器和用具

He－Ne 激光器，偏振片，磁光调制器(石榴石单晶薄膜)，低频信号发生器，示波器，测量放大器，硅光电池，灵敏电流计，AC 毫安表，DC 毫安表，直流稳压电源.

原理

当平面偏振光穿过介质时，若对介质沿平行于光的传播方向施加一磁场，光波的偏振面将发生旋转，旋转角度的大小正比于磁场强度. 这种现象称为磁光效应，是英国科学家法拉第(M. Faraday)在 1845 年首先发现的，这是由于磁场使介质具有旋光性. 实验指出，偏振面旋转的角度 θ 与光波在介质中的路程 l 和磁场强度 $\boldsymbol{B}$ 在光波传播方向上的分量成正比：

$$\theta = V \cdot l \cdot B \qquad (23-1)$$

式中比例系数 V 称为韦尔代(Verdet)常数，它表征物质的磁致旋光特性，几乎所有物质包括气体、液体和固体都有磁光效应，只是一般都很微弱，其韦尔代常数都很小. 对于不同的物质，旋光方向还可能相反. 习惯上，以顺着磁场观察的人为标准，旋光方向是右旋(顺时针旋转)的，称为正旋，$V>0$；反之，称为负旋，$V<0$.

实验还表明，磁致旋光的方向与磁场的方向有关，而与光的传

播方向无关. 这一点与自然旋光物质不同,自然旋光过程是可逆的,旋光的方向与光的传播方向有关,如果光束由于反射,一正一反两次通过自然旋光物质,则因旋转角相等,方向相反而抵消,累积的旋光角度等于零;而磁光效应是不可逆的,如果光束在磁光介质中往返一回,只要磁场强度和方向不变,旋转角度将加倍. 这个性质使得它在光学技术,特别是激光技术中获得重要的应用,例如用来作为光调制,光开关,光隔离,光偏转,光信息处理等功能的磁光器件.

与自然旋光物质相似,磁致旋光也有色散,实际上磁致旋光物质的韦尔代常数随波长 λ 的增加而减小.

磁旋光材料,不仅要有高的 V 值,而且要有高的光学质量,它们大都是含量相当高的重金属或稀土金属离子的光学玻璃,这种光学玻璃又可分为两类:呈抗磁旋光效应的玻璃,即 $V>0$,取一级近似时,它与温度无关;呈顺磁旋光效应的玻璃,即 $V<0$,它反比于热力学温度. 普通铝硅酸盐玻璃(火石玻璃)是抗磁性旋光材料的典型,这类光学玻璃光学质量高,吸收低,大多被用来做大功率的光波隔离器.

顺磁旋光玻璃是将某种合适的稀土金属离子高浓度地溶解在玻璃基质中而得到的,V 值近似地正比于稀土离子的浓度,但过高的浓度会使玻璃的光学质量变差. 已知 Ce^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+}、Tb^{3+}、Dy^{3+} 和 Ho^{3+} 等具有最强的磁光效应,但三阶稀土离子在可见光和近红外有一些吸收带,限制了它们的应用范围.

一般,固体和液体的韦尔代常数的数量级约为 $10^{-6}\mathrm{min\cdot T^{-1}\cdot cm^{-1}}$,但稀土玻璃的韦尔代常数要大得多,约为 $1.3\times10^{-5}\sim2.7\times10^{-5}\mathrm{min\cdot T^{-1}\cdot cm^{-1}}$,具体数值随玻璃中所含的稀土元素的种类、浓度和光波波长而异. 近一、二十年发现了另一种类磁光材料——石榴石晶体,这一族晶体系铁磁性材料,故其韦尔代常数较稀土玻璃更大,相差约有五、六个数量级,国内已用石榴石晶体(分子式为 $Y_3Fe_5O_{12}$,常以 YIG 表示)等制成各种磁光器件,应用已扩展到磁泡、光计算、光显示、光录制、光复制、光纤通信和光信息处

理尖端技术领域，出现了磁光材料发展的新阶段．本实验使用的磁致旋光材料系国内研制的一种新型磁光材料——磁光石榴石单晶薄膜[$(PrGdYb)_{3-x}Bi_x(FeAl)_5O_{12}$]，它具有高旋光效率，在500～760 nm的可见光波段中光吸收系数小，温度稳定性好等优点，尤其在垂直膜面的通光方向上易于磁化，且不需使用强大的电磁铁，对实验的进行更为方便．

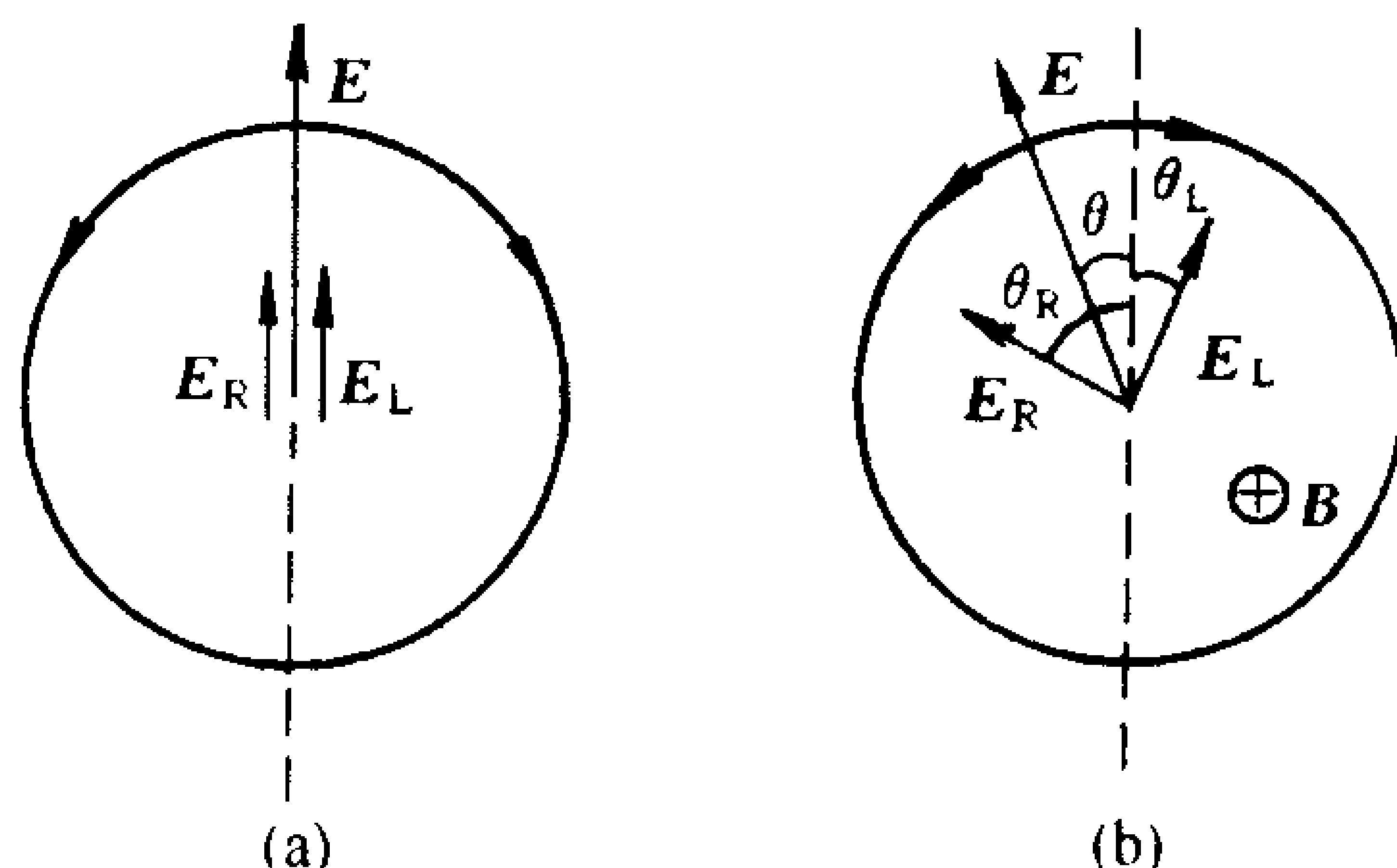


图 23－1

与自然旋光类似，偏振面旋转运动的起源也是一种圆双折射．在这里，传播光波的简正模是左旋圆偏振光和右旋圆偏振光，如图23－1所示，在磁光介质的表面上，入射线偏振光的电矢量 $\boldsymbol{E}$ 可以分解为图23－1(a)中两个旋转方向相反的圆偏振光 $\boldsymbol{E}_L$ 和 $\boldsymbol{E}_R$．它们在介质内平行于磁场方向传播时，速度不同，或者说介质对它们有不同的折射率 n_L 和 n_R(脚标L和R分别代表左与右，以下同)，平行于磁场方向传播的线偏振光，一进入介质立即分解成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光，穿过厚度为 l 的介质后，两圆偏振光产生相位滞后分别为

$$\theta_L = \frac{2\pi}{\lambda} n_L \cdot l$$
$$\theta_R = \frac{2\pi}{\lambda} n_R \cdot l \qquad (23-2)$$

因圆偏振光的相位即是旋转电矢量 $\boldsymbol{E}$ 的角位移，相位滞后表示角位移倒转，而电矢量 $\boldsymbol{E}$ 始终位于 $\boldsymbol{E}_L$ 和 $\boldsymbol{E}_R$ 的分界线上，故由图

23-1(b)可直接看出

$$\theta_R - \theta = \theta_L + \theta$$

即
$$\theta = \frac{1}{2}(\theta_R - \theta_L) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_R - n_L)\cdot l \tag{23-3}$$

上式表明,若 $n_R > n_L$,有 $\theta > 0$,表示右旋;若 $n_R < n_L$,有 $\theta < 0$,则表示左旋. 如果折射率之差 $n_R - n_L$ 正比于磁场强度 B,则从式(23-3)便能得到式(23-1).

式(23-3)也同时反映出磁致旋光的转角 θ 还与光波波长有关,即可以解释旋光色散现象. 但上述唯象的解释并未说明磁场为什么会使左、右圆偏振光具有不同折射率这个本质问题. 用经典电子论处理介质色散的方法,物理图象比较直观,导出的结果也与实验相符. 由此推得磁光效应的旋光角 θ 公式为

$$\theta = -\frac{1}{2c}\frac{e}{m}\lambda\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}lB \tag{23-4}$$

式中 e、m 分别为电子的电荷和质量,λ 为光波波长,$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}$ 为无磁场时介质的色散,B 为磁场强度在光传播方向上的分量,l 为晶体的厚度. 式(23-4)说明,磁致旋光角的大小除与介质的厚度 l,磁场强度 B 成正比外,还与入射光波的波长 λ,介质的色散$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\lambda}$有密切关系. 实验还表明,式(23-1)仅在一定的实验条件下近似成立,只有通过实验,保持入射光波长不变,测定旋光角 θ 与外磁场 B 的关系曲线,才可以全面了解介质的磁致旋光特性.

量子力学方法是基于色散的一般理论,同时考虑磁场对原子或分子能级的影响,所以结果较准确,但较为繁琐,因超出本课题的范围,不进行讨论.

如图 23-2 所示,在起偏器 P 和检偏器 A 之间加入一个励磁线圈(调制线圈)、磁光石榴石单晶薄膜和低频信号源,就组成磁光调制器. 当线圈未通电,并不计光透过薄膜的吸收,则透过检偏器出射的光强 I 为

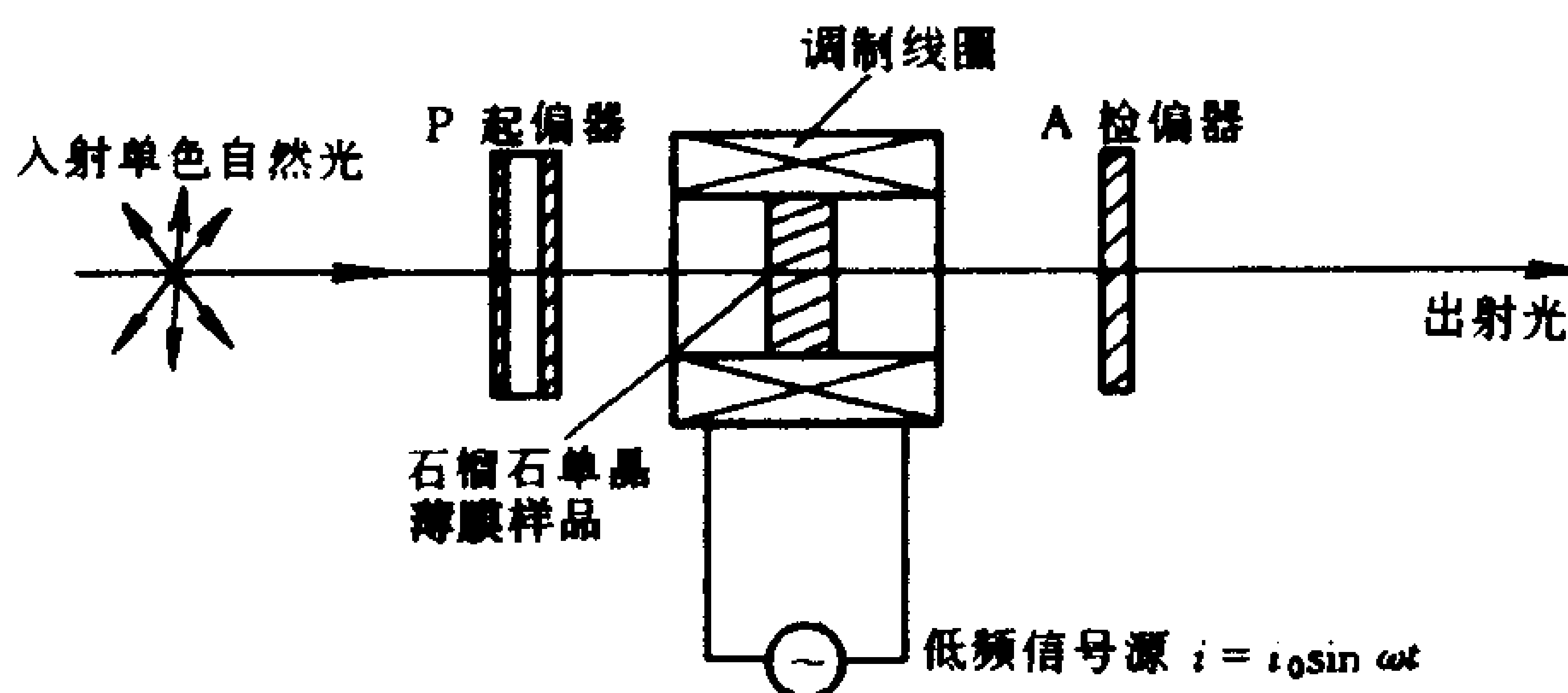


图 23-2

$$I = I_0\cos^2\alpha \qquad (23-5)$$

式中 α 为起偏器和检偏器主截面之间的夹角，I_0 为 $\alpha=0$ 时的输出光强. 当线圈通以交变信号电流 $i=i_0\sin\omega t$ 时，调制线圈产生磁场 $B=B_0\sin\omega t$，使单晶薄膜产生相应的旋光角 $\theta=\theta_0\sin\omega t$，$\theta_0$ 称为调制角幅度，由式(23-5)可见，从检偏器输出的光强将变为

$$I = I_0\cos^2(\alpha+\theta) = I_0\cos^2(\alpha+\theta_0\sin\omega t) \qquad (23-6)$$

由式(23-6)可知，当 α 一定时，输出光强受交变磁场 B 或信号电流 i 的控制，从而使信号电流产生的旋光角转化为对输出光强的调制，这就是磁光调制的工作原理.

描述磁光调制器性能的两个参量是调制角幅度 θ_0 和光强调制深度 η. 磁光调制器的光强调制深度 η 的定义为

$$\eta = \frac{I_{max}-I_{min}}{I_{max}+I_{min}} \qquad (23-7)$$

式中 I_{max} 和 I_{min} 分别为调制器输出光强的最大值和最小值. 令

$$A = I_{max}-I_{min} \qquad (23-8)$$

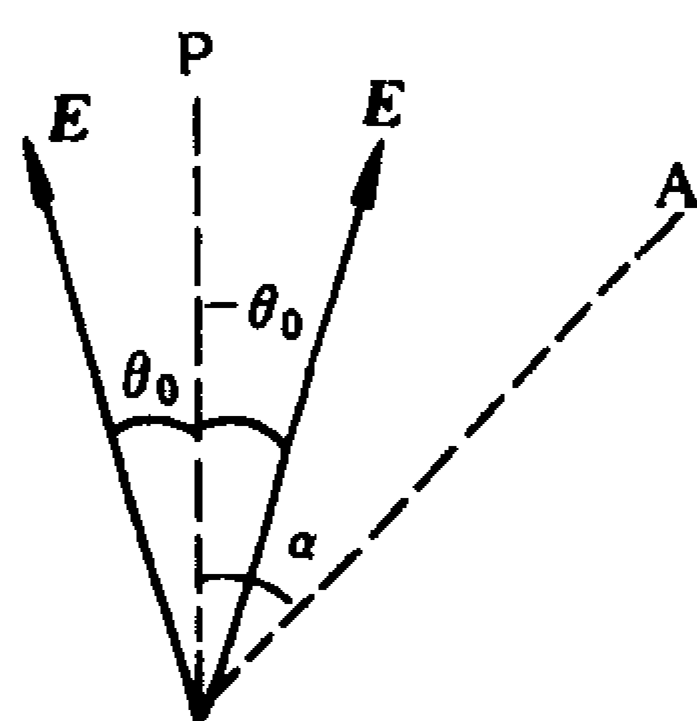


图 23-3

称为光强调制幅度. 在 $0\leqslant\alpha+\theta\leqslant\frac{\pi}{2}$ 条件下，由图 23-3(图中虚线 P 代表起偏器 P 的主截面，虚线 A 代表检偏器 A 的主截面.)可

知，当 $\theta = \mp\theta_0$ 时，调制输出的光强分别为 I_{max} 和 I_{min}，根据式(23－6)，应用倍角公式，则有

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{I_0}{2}[1 + \cos 2(\alpha - \theta_0)] \\ I_{min} &= \frac{I_0}{2}[1 + \cos 2(\alpha + \theta_0)] \end{aligned} \qquad (23-9)$$

将上式代入式(23－8)，化简后得

$$A = I_0 \sin 2\alpha \sin 2\theta \qquad (23-10)$$

式(23－10)表明，在调制角幅度 θ_0 一定时，若起偏器与检偏器的主截面之间的夹角 $\alpha = 45°$，则光强调制幅度为最大，并等于

$$A_{max} = I_0 \sin 2\theta. \qquad (23-11)$$

因此，为了获得较大的调制幅度，均选取 $\alpha = 45°$. 此时，调制输出的极值光强为

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{I_0}{2}(1 + \sin 2\theta_0) \\ I_{min} &= \frac{I_0}{2}(1 - \sin 2\theta_0) \end{aligned} \qquad (23-12)$$

将上式代入式(23－7)，即可求得 $\alpha = 45°$ 时的调制深度 η 和调制角幅度 θ：

$$\eta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \sin 2\theta \qquad (23-13)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}\right) \qquad (23-14)$$

如果测得磁光调制器输出的最大光强 I_{max} 和最小光强 I_{min}，即可由(23－13)和(23－14)两式求出调制深度 η 和调制角幅度 θ_0.

实验内容

一、测定磁光石榴石单晶薄膜的旋光角 θ 与外加磁场 B（或励磁电流 I_0）的关系曲线

1. 将 He－Ne 激光器 L，减光偏振器 P_1、起偏器 P、检偏器 A

和内装单晶薄膜样品S的励磁线圈M以及硅光电池P_c和灵敏电流计G等按图23－4放置好，并将调制线圈接入直流稳压电源和直流毫安表的电路中，旋转偏振片P_1，可以改变透过P的平面偏振光的强度.

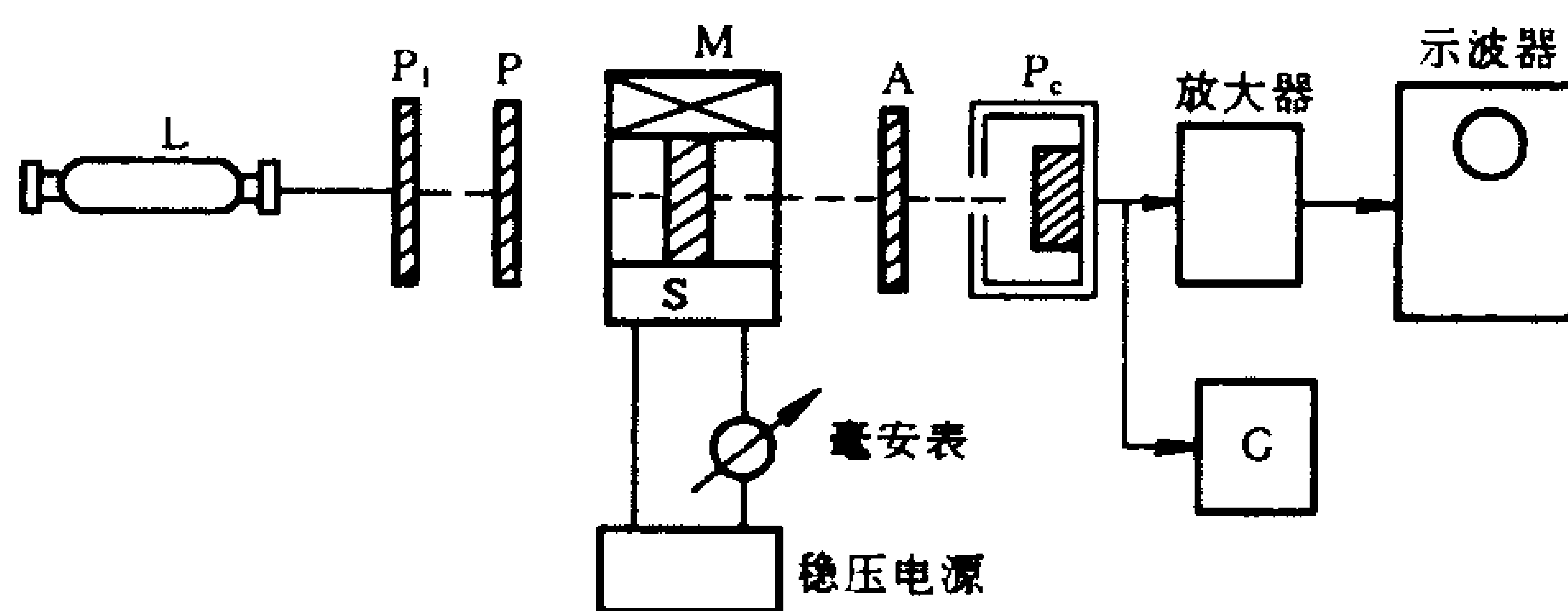


图23－4

2. 点亮激光器，待稳定半小时后，调节P和A主截面的相对方位，使P与A正交，这时，灵敏电流计的指示应为零.

3. 开启直流稳压电源，在励磁线圈中通以电流I，因磁致旋光，透过A的光强不再为零，转动A使灵敏电流计恢复到零，记录检偏器A转动的角度θ.

4. 从小到大逐渐增加励磁电流I，每隔10 mA测一次θ，测出对应于不同磁场的旋光角θ，作出$\theta-B(I)$曲线.

5. 确定θ的饱和值与相应的饱和磁场B_m，并指出该样品的旋转方向.

二、观察磁光调制现象

1. 在图23－4实验光路中，将直流稳压电源和直流毫安表代之以低频信号发生器和交流毫安表，输出光信号由硅光电池接收，经放大后输入示波器. 在荧光屏上显示被调制的信号.

2. 切断低频信号源，转动检偏器A，使透射光强为零，此时$\alpha=90°$，处于消光状态. 从消光位置开始，将检偏器A转过45°，保

持起偏器 P 与检偏器 A 的相对方位不变($\alpha=45^\circ$).

3. 接通低频信号源,选择调制频率为 500 Hz. 输入交变电流为 I'(有效值),在示波器上即可观察输出的调制信号波形.

4. 读出波形曲线上相应的 I_{max} 和 I_{min}(以格值表示),代入式(23-13)和式(23-14),计算调制深度 η 和调制角幅度 θ_0.

5. 逐步增大输入电流的有效值 I',每隔 10 mA,测量一次 θ,同样方法测出对应不同电流的 I_{max} 和 I_{min},作出 $\theta_0-B(I)$ 和 $\eta-B(I)$ 曲线,确定 θ_0 和 η 的饱和值.

本实验所用的调制器有关参量:

调制线圈线径 $\phi=0.29\sim0.31$ mm,匝数 $N=4\ 000\sim4\ 500$ 匝,最大励磁电流 200 mA,样品的透过率

$$T=25\%\sim30\%(\lambda=632.8\text{ nm}),$$

旋光角(饱和值)$=7^\circ\sim10^\circ$.

注意事项

1. 如测量的磁光介质不是磁光石榴石单晶,例如稀土玻璃等样品,因其韦尔代常数较小,必须使用电磁铁,以增加磁场 B,使旋光角成为易测量. 此时可应用汞灯照明,配用不同波长的滤光片,用高斯计测出磁场强度,用测长计测出待测样品长度,根据公式(23-1)可算出室温时对应于不同波长的韦尔代常数.

2. 测量磁旋光角 θ 时,如应用普通的起偏、检偏方法,用人眼直接判断全消光位置,误差较大,特别是测量光路中有非偏振的杂散光混入时误差将更大. 另外一般偏振器度盘的刻度均较粗. 为提高测量精度,利用人眼可以相当准确地判断双光束照明的视场照度是否相等的特点,参照实验十一中练习二旋光计的实验,只须将调制线圈共轴放在测定糖浓度的液管的位置上,即可采用半荫法测定旋光角,由旋光仪上的光学刻度盘准确读数. 不过,半荫视场(或三分视场)中使用的半波片是对特定波长而言的,因此在使用旋光仪进行测定时,必须使用相应单色波长的照明光源.

3. 为获得最大的调制幅度 A_{max}，并应用公式(23－13)和(23－14)测定调制深度 η 和调制角幅度 θ_0，必须在实验前准确调节，使起偏器P和检偏器A的主截面之间的夹角 $\alpha=45°$. 调节 $\alpha=45°$的一种参考方法如下：

(1) 如图23－4所示，断开低频信号源，即在不加磁场的条件下，旋转检偏器A使之与起偏器P正交，此时从A输出的光强为 $I=I_0\cos^2 90°=0$，记录示波器荧光屏上相应的零光强水平亮线的位置.

(2) 旋转检偏器A，则输出光强将增大，荧光屏上的水平亮线亦将随之上升，待升到最大高度时，输出最大光强为 $I=I_0\cos^2 0°=I_0$，即检偏器A已调节到与起偏器P主截面平行的方位，再记录荧光屏上相应于最大光强 I_0 的水平亮线的位置.

(3) 继续旋转检偏器A，则从A输出的光强 I 随之减小，当荧光屏上的水平亮线降至最大高度的一半时，因 $I=I_0\cos^2 45°=\frac{I_0}{2}$，即两偏振器的主截面之间的夹角已调节为 $\alpha=45°$的状态.

4. 由于输入电信号太大时，会导致光调制信号发生畸变，在示波器上显示出削顶失真现象，为此实验时输入信号的幅度不宜过大，以保证调制工作点位于 $\theta-B$ 曲线的线性部分，以获得无畸变的正弦输出信号.

复习思考题

1. 在图23－4实验装置中，硅光电池产生的光电信号经放大后，放大器的输入端必须接示波器的Y轴直流输入端，为什么？若接交流输入端行不行？为什么？

2. 设计一个实验方案，测定法拉第旋光角 θ 在可见光波段内的旋光色散曲线($\theta-\lambda$ 曲线).

实验二十四　电光效应和电光调制

目的

1. 了解电光调制的基本原理和方法；
2. 测量电光调制器的主要特性参量；
3. 观察电光调制现象.

仪器和用具

He－Ne 激光器(连电源),偏振片(3 片),铌酸锂调制晶体,直流高压电源,信号电源(音频信号发生器),硅光电池,灵敏电流计,选频放大器,示波器,1/4 波片,光具座.

原理

某些晶体(固体或液体)在外加电场中,随着电场强度 E 的改变,晶体的折射率会发生改变,这种现象称为电光效应,电光效应可分两种：

(1) 若折射率的改变正比于电场强度 E,称为一级电光效应,或称泡克耳斯(Pockels)效应.

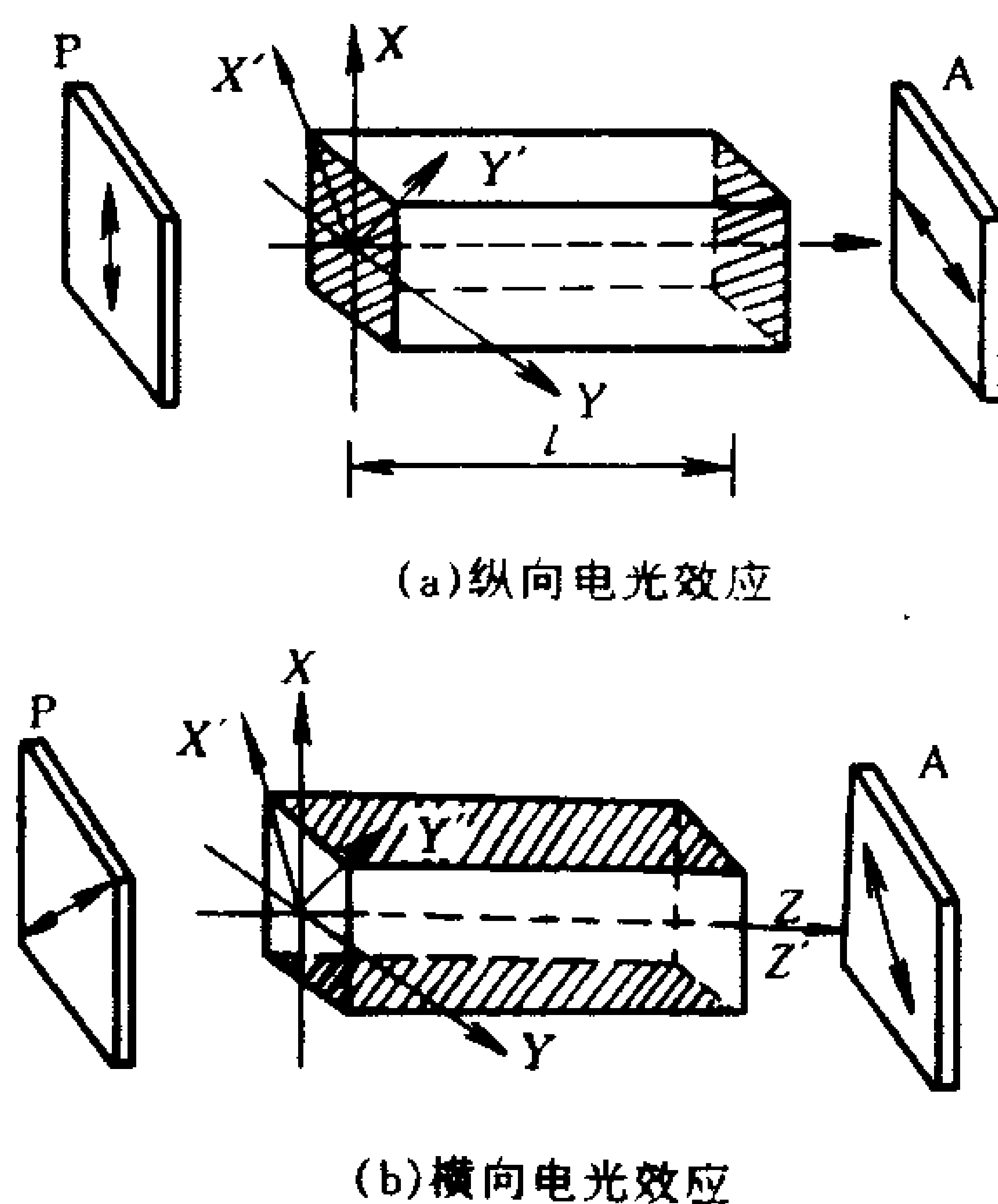
(2) 若折射率的改变正比于电场强度 E 的平方,称为二级电光效应,或称克尔(Kerr)效应.

利用电光效应的材料,可以制成通过外电场强度迅速调制偏振光的相差的光学元件,称为电光调制器. 电光调制器在光学技术中,得到广泛的使用. 例如在激光通讯中,电光调制器是一个重要部件,将信息光变为电讯号,再将这电讯号施加到电光晶体上调制输出光束,随着光波的传输,信息也就随之而传播,到达目的地后,接收光波并从中解调出信息来,达到光通讯的目的. 本实验只讨论晶体制成的电光调制器,且仅限于晶体的一级电光效应.

若把有电光效应的晶体切割成长方形，X、Y、Z 轴为晶体的主轴，Z 轴为晶体的光轴，在与光轴相垂直的两端面上镀一层透明电极，并在极面加一强电场，如图 24－1(a)所示，实验结果表明：原来的光轴(Z 轴)已不复存在，代之以在 XY 平面上存在两个互成 90°的主振动方向，它们就是端面正方形的对角线方向(图中的 X′和 Y′轴)，由于这两个分量的相位传递速度是不同的，光波经过晶体后，出射光波两振动分量的附加相差是

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n' - n'')l \qquad (24-1)$$

其中 n'和 n''分别是对于光波的两分量的折射率，l 是晶体的长度，λ 是入射光波的波长，$(n' - n'')$称为感生折射率差，它与电场强度 E 成正比，即 $\Delta n = (n' - n'') = n_0^3 rE$．式中 n_0 为晶体对寻常光的折射率，r 为一与晶体结构及温度有关的常量，称为电光系数．图 24－1(a)所示中，外加电场的方向与光的传播方向平行，故称为纵向电光效应．



(a)纵向电光效应

(b)横向电光效应

图 24－1

如果入射光方向平行于晶体的光轴(Z 轴)方向，外加电场矢

量平行于 X 轴，如图 24－1(b)所示，则当施加电场时，在电场的作用下，晶体的主轴 X 轴和 Y 轴绕 Z 轴旋转 45°，而形成新的主轴 X′、Y′、Z′，且 Z′轴与 Z 轴重合，这时，它们的感生折射率差也与所施电场强度成正比，

$$\Delta n = n' - n'' = n_0^3 r' E \qquad (24-2)$$

因为这时外加电场方向与光的传播方向垂直，故称为横向电光效应，它的电光系数与纵向的不同，式中用 r' 表示，由于感生折射率与电场强度 E 的一次方成正比，这种效应称为泡克耳斯效应或一级电光效应，它只存在于不具有对称中心的晶体中.

由于电光晶体的感生折射率差与外加电场有关，因而当一束线偏振光从长度为 l 的晶体中射出后，两个振动分量就产生一个固定的相差 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n \cdot l$，这样就有可能将这种晶体制成可以用外加电场 $\boldsymbol{E}$ 调制相差的晶片，称之为电光调制器，它又可分为纵向调制型和横向调制型，本实验使用铌酸锂($LiNbO_3$)晶体作调制器，并采取横向调制，由于电场 $\boldsymbol{E}$ 的数值是不易测量的，故实验中用垂直于 $\boldsymbol{E}$ 的两个晶体表面上的电位差 $U(=Ed)$来代替，(d 是这两个表面之间的晶体厚度)，这时，通过 l 长度晶体后的相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r' E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r' \left(\frac{l}{d}\right) U \qquad (24-3)$$

上式说明，相差 δ 与电压 U 成正比，并与因子 $\left(\frac{l}{d}\right)$ 有关，故如将晶体做成扁长形，使 $\frac{l}{d} > 1$，就可以显著降低样品的半波电压，这是横向型电光效应的一个重要优点.

所谓“半波电压”，就是使两束偏振光通过长度 l 的晶体后产生的相差 $\delta = \pi$ 时，所对应的施加电压值，通常记为 U_π(或 $U_{\lambda/2}$)，当 $\delta = \pi$ 时，从式(24－3)可得

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2 n_0^3 r'} \cdot \frac{d}{l} \qquad (24-4)$$

从上式可见,电光调制器的半波电压 U_π 是决定于入射光的波长 λ,晶体的材料和它的几何尺寸,半波电压的大小表示电光调制器对 δ 的调制能力的大小,它是电光调制器的一个重要特性常量,调制器的半波电压确定后,两束偏振光通过晶体,产生的相差 δ 与外加电压 U 的关系是

$$\delta(U) = \pi \frac{U}{U_\pi} + \delta_0 \tag{24-5}$$

式中 δ_0 是 $U=0$ 时的 δ 值,它与晶体材料和切割加工方式有关,对于良好加工的纯净晶体来说,$\delta_0=0$,由上式可知,相差 δ 随外加电压 U 而变化.

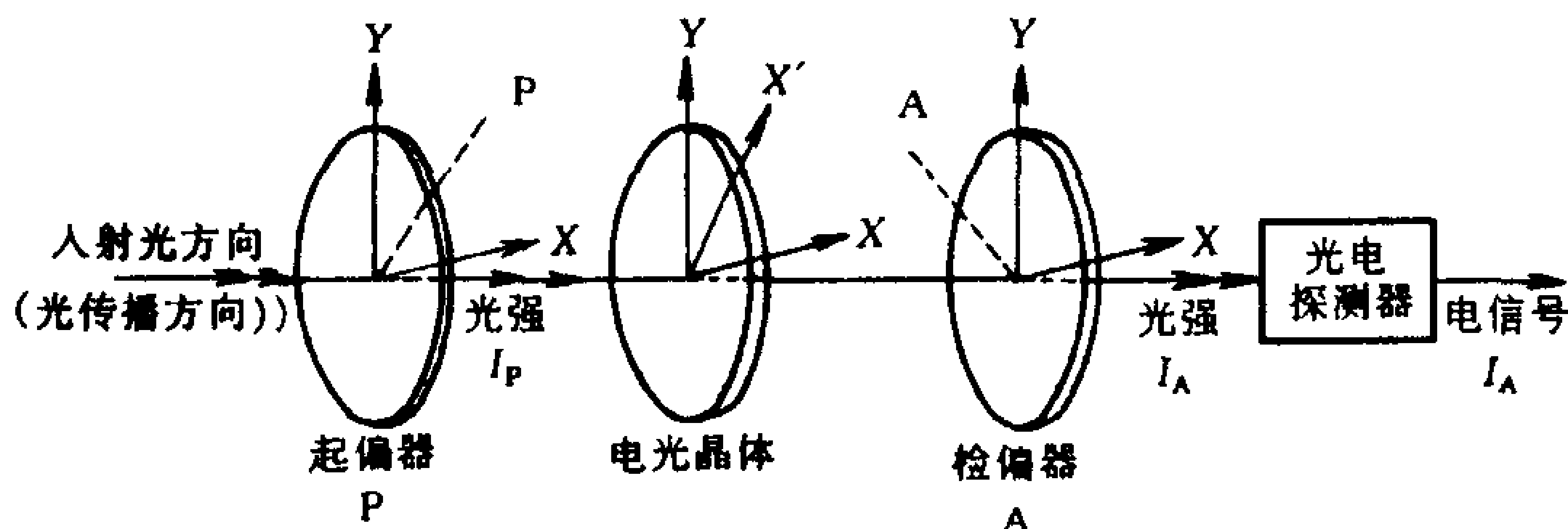


图 24-2 电光调制的工作原理图

图 24-2 所示为电光调制器的工作原理图,在光路中,以→→表示传播方向,虚线 P 代表起偏器 P 的主截面,虚线 A 代表检偏器 A 的主截面,起偏器 P(或检偏器 A)都只透射光波中平行起偏器 P 的主截面(或检偏器 A 的主截面)的振动分量,X 和 Y 是电光晶体的 X 轴和 Y 轴,当直线偏振光(振动方向平行于起偏器 P 的主截面)垂直于通光表面经过电光晶体时,光束将分解成两个线偏振光,通过晶体后其 X 分量比 Y 分量多增加相差 $\delta(U)$,然后再经过检偏器 A,在起偏器 P 的主截面与检偏器 A 的主截面互相垂直的情况下,输出光强

$$I_A = I_P \sin^2[2(\theta_P - \theta_X)]\sin^2\left[\frac{\delta(U)}{2}\right] \tag{24-6}$$

式中$(\theta_P-\theta_X)$是起偏器P的主截面与X轴的夹角，$\delta(U)$为电光调制器的相差，由式(24－6)可见，可以用电压U来调制输出光强I_A，由于

$$\frac{\mathrm{d}I_A}{\mathrm{d}U}\propto I_P\sin^2[2(\theta_P-\theta_X)],$$

因此一般取$\theta_P-\theta_X=\pm45°$，这时U对I_A的调制作用最大，并且

$$I_A = I_P\sin^2\left[\frac{\delta(U)}{2}\right] \qquad (24-7)$$

$I_A-\delta(U)$曲线如图24－3所示．将式(24－5)代入式(24－7)，则

$$I_A=I_P\sin^2\left[\frac{1}{2}\left(\pi\frac{U}{U_\pi}\right)\right]$$

这曲线也可表示I_A-U关系．

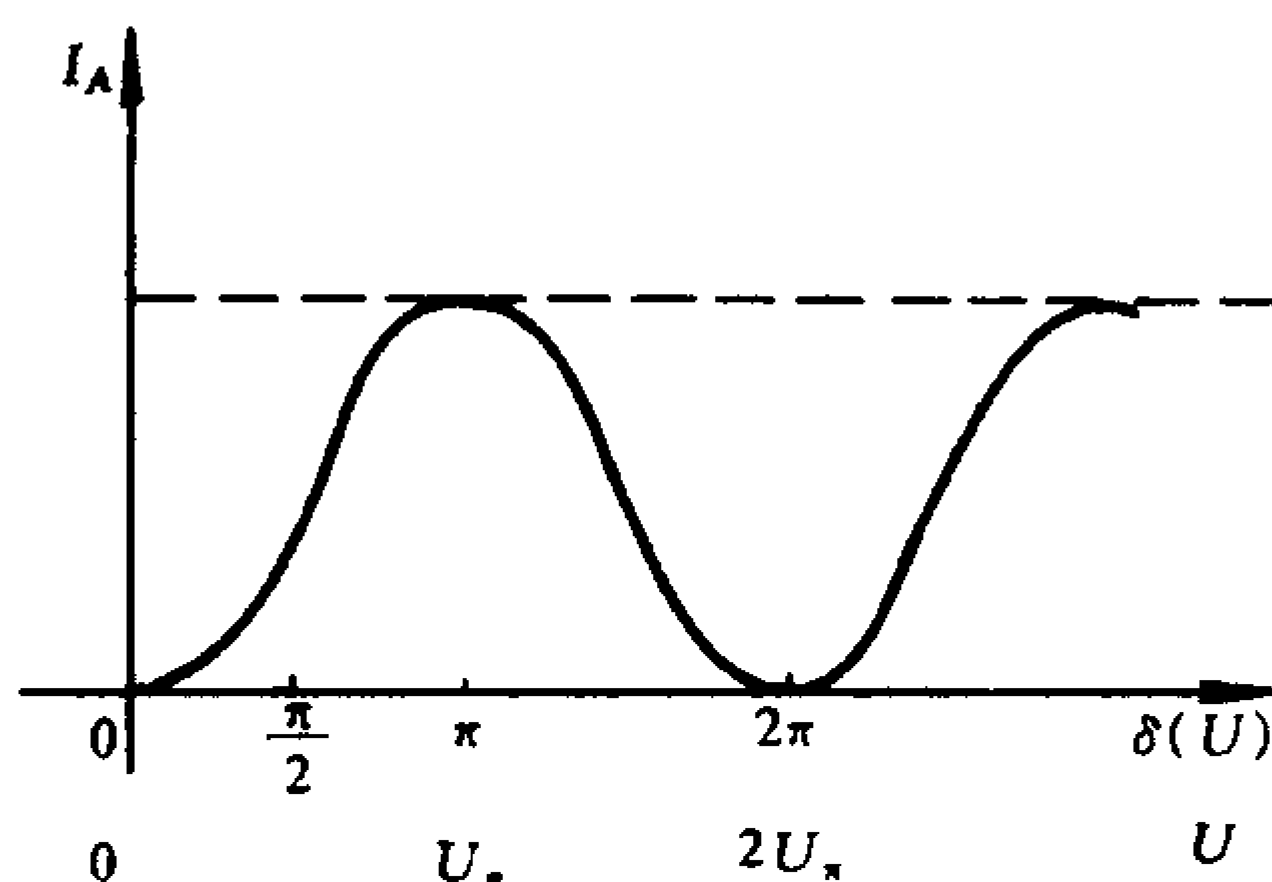


图24－3　光强I_A与$\delta(U)$、U的关系

由式(24－7)可知，光强I_A由相差$\delta(U)$决定，当$\delta(U)=2k\pi(k=0,1,2,\cdots)$时，应有$I_A=0$；当$\delta(U)=(2k+1)\pi(k=0,1,2,\cdots)$时，$I_A=I_P$，当$\delta(U)$为其它值时，$I_A$在0到$I_P$之间变化，然而由于晶体材料的缺陷，不均匀性和加工工艺的限制，光会在晶体内发生吸收和散射，并使光波的两个振动分量的传播方向不完全重合，从晶体射出的光束截面也就不可能重叠起来，如果两个偏振器处于正交状态，且$\theta_P-\theta_X=\pm45°$，当外加电压$U=0(\delta(U)=0)$时，透射光强$I_A\neq0$，而只是一个最小值I_{min}；而当U

$=U_\pi(\delta(U)=\pi)$时，I_A 也不等于 I_P，而只是一个最大值 I_{max}，为了定量描述这种性质，引入电光晶体的另外两个特征常量，消光比 M 和透光率 T，它们分别定义为

$$M=\frac{I_{max}}{I_{min}}$$
$$T=\frac{I_{max}}{I_0} \qquad (24-8)$$

其中 I_0 是把电光晶体从光路中移去后，转动检偏器 A 得到的输出光强最大值，显然，M 值越大，T 值越接近 1，表示该晶体的电光性能越好，一般的晶体 $M\approx10^2$，它和晶体的质量和加工精度有关.

半波电压 U_π，消光比 M 和透射率 T 是表征电光调制器质量的三个特征常量，这三个常量都应在垂直入射的条件下测得.

从图 24－3 可以看出，当相差在$\frac{\pi}{2}$附近区间时，光强 I_A 与相差 δ 为直线关系，电光调制器的工作点一般就选在 $\delta=\frac{\pi}{2}$附近处；选择的工作点不同，输出信号将有不同程度的失真. 图 24－4 为外加交变电信号时，调制器输出信号的波形.

从图 24－4 的波形曲线可以看出，调制器的工作点选在非线性部分，即在 $\delta=k\pi(k=0,1,2,\cdots)$附近时，输入信号如曲线 1 所示，则输出光信号将发生严重的畸变，而且调制频率是外加电信号的两倍(见曲线 3)；只有把调制器的工作点选在接近直线的部分，即在 $\delta=\frac{\pi}{2}$附近，当输入一个小的调制电信号时(见曲线 2)，则输出光强的变化能正确地反映调制信号的变化，且输出光强的调制频率就等于外加电信号的频率(见曲线 4)，为此，可在调制器上加一个等于$\frac{1}{2}U_\pi$ 的直流电压，称为偏置电压，或者在光路上插入一个 1/4 波片，其快轴平行于电光晶体的 X 轴，即加上“光偏压”$\left(相当于使调制器产生一个固定的相差 \delta=\frac{\pi}{2}\right)$，这样就使调制器

的工作点移到了线性部分，在调制信号幅度不太大时，输出信号的波形真实地反映原来的信号电压的波形，但当调制信号太大时，输出光强的波形也将发生失真现象.

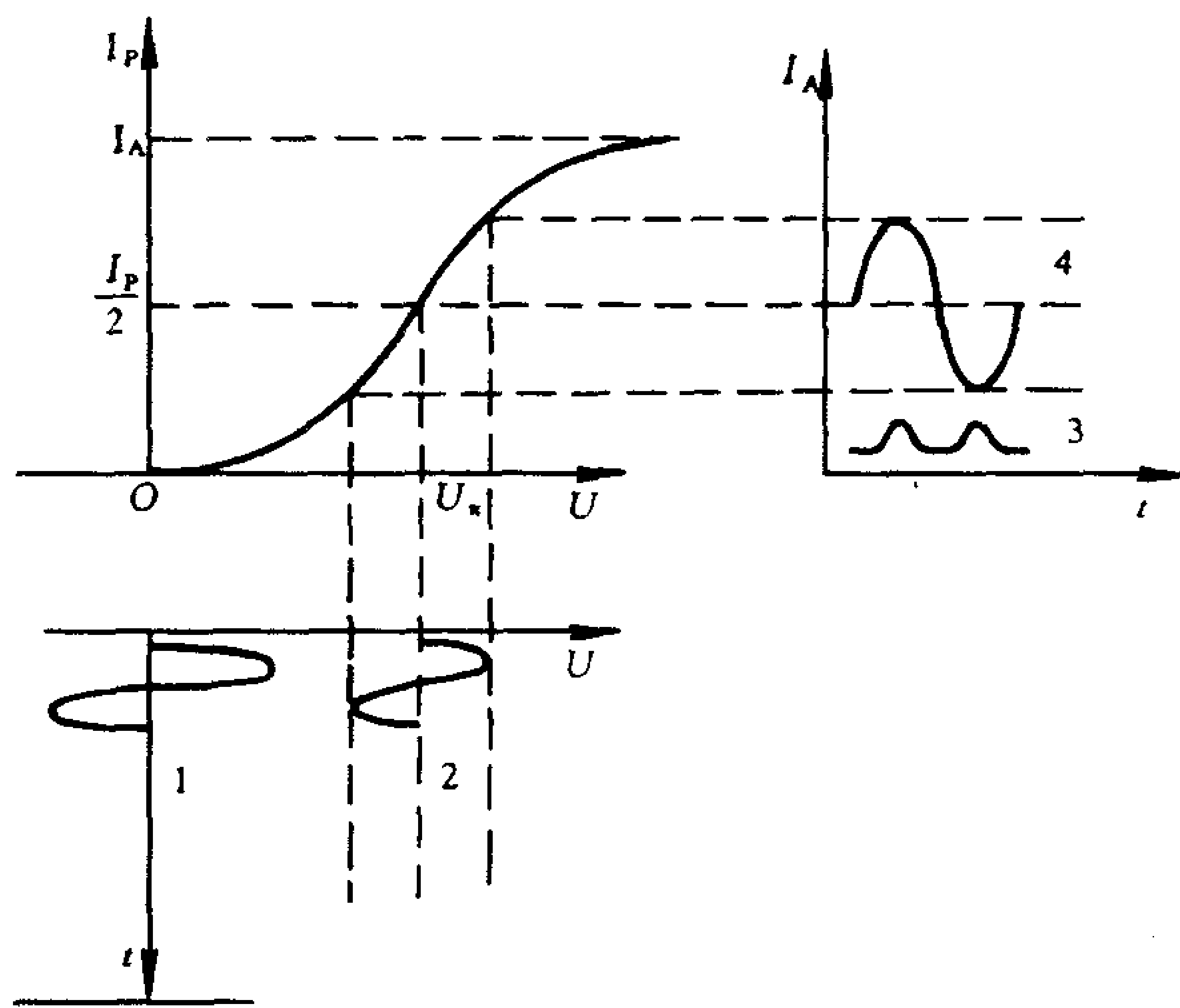


图 24－4

综上所述，电光调制是利用晶体的双折射现象，将入射的线偏振光分解成 o 光和 e 光，利用晶体的电光效应由电信号改变晶体的折射率，从而控制两个振动分量形成的相差 δ，再利用光的相干原理使两束光叠加，从而实现光强度的调制. 晶体的电光效应灵敏度极高，调制信号频率最高可达 $10^9 \sim 10^{10}$ Hz，因此在激光通信、激光显示等领域内，电光调制得到非常广泛的应用.

实验内容

一、调整好光路系统

1. 按图 24－5 所示，在光具座上先放置好 He－Ne 激光器和减光器 P_1，点亮激光器，调节激光管的方位，使激光束基本水平并

与光具座的导轨基线平行，放入硅光电池使其表面与激光束垂直，且光点落在光电池的中心(为了防止光电池疲劳，不能使强激光束长时间照射)调节好后随即盖好罩盖(使用时随时打开)。

减光器 P_1 的作用是减弱光束的强度，以调节光强 I_P 的值，只要以光束为轴，旋转 P_1，就可使出射光强度适当。

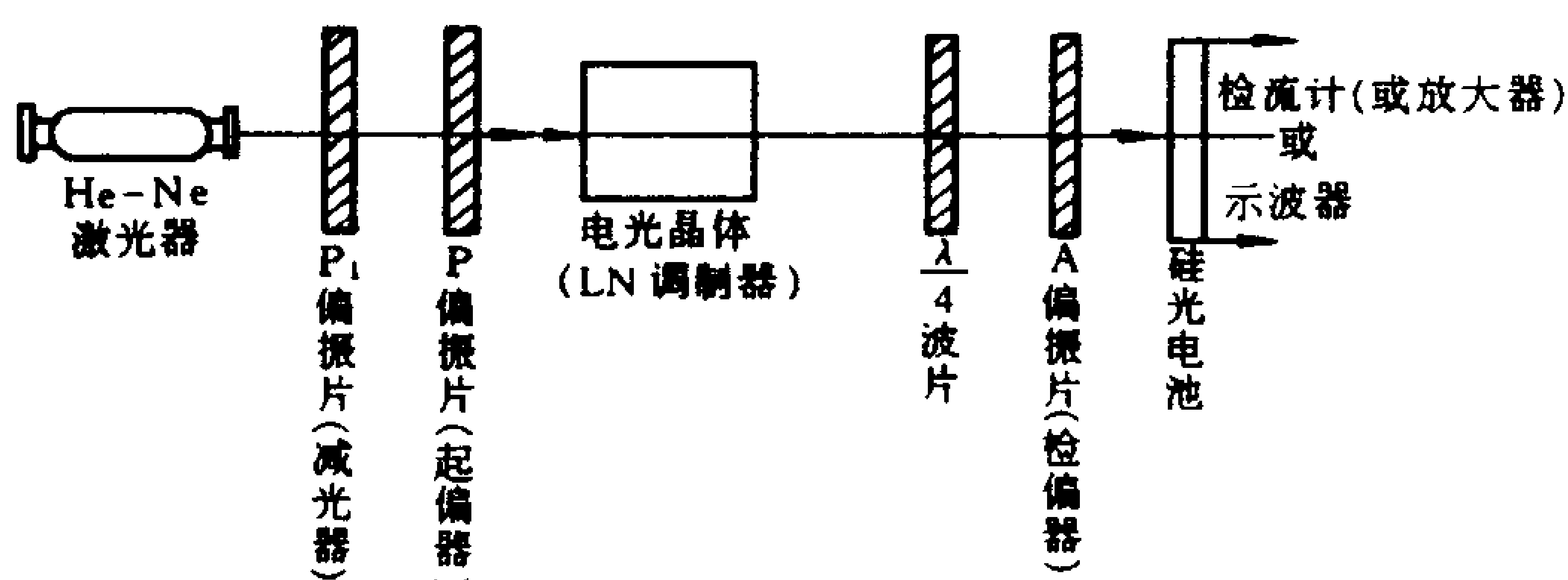


图 24-5 实验装置图

2. 放入起偏器 P，使其表面与激光束垂直，并令其透光轴与水平方向成 45°角，记下起偏器的读数 θ_P。

3. 放入检偏器 A，使其表面也与激光束垂直，并转动检偏器，使其与起偏器正交，即使检偏器 A 的主截面与起偏器 P 的主截面垂直，这时光点消失，灵敏电流计读数为零，在以后的测量中这两偏振器的相互位置不再改变，记下检偏器的读数 θ_A。

4. 将铌酸锂晶体置入光路，调节晶体使其 X 轴在铅直方向，并使其通光表面垂直于激光束(这时晶体的光轴 Z 轴与入射光方向平行，成正入射)，这时 $\theta_P - \theta_X = 45°$，灵敏电流计读数应为零(如不为零，可适当调节减光器 P_1，使电流计读数为零，或读数最小，接近于零)。

二、测量电光调制器的静态特性曲线及主要特征参量

1. 将直流高压加到晶体上，从零到最大允许值等间隔地改变电压(U)值，测出对应于每一个 U 值的电流计读数 i_A[这里 i_A 是

透过检偏器的激光束的辐射功率 P_A(光强 I_A)产生的光电流,而硅光电池的输出电流是 i_A 和由于热效应及杂散光产生的电流的总和,在尽量减少杂散光并当正入射的条件下,可以认为 $i_A \propto I_A$],作 $i_A - U$ 曲线,它正确反映了 $I_A - U$ 的关系,称为电光调制器的静态特性曲线,曲线应包括 i_A 的极大值 $i_{max}(I_{max})$和极小值 $i_{min}(I_{min})$,与 i_{min}对应的电压 U 即为半波电压U_π.

本实验使用的晶体的 U_π 约为 250 V,根据它的绝缘性能,最大允许电压为 500 V,切勿使电压值超过此值,以免损伤晶体.

2. 将电光晶体从光路中取出,旋转检偏器 A,测出最大光电流值 i_0,此即为输出光强的最大值 I_0,计算电光晶体的消光比 $M = \frac{I_{max}}{I_{min}}\left(=\frac{i_{max}}{i_{min}}\right)$和透射率 $T=\frac{I_{max}}{I_0}\left(=\frac{i_{max}}{i_0}\right)$.

3. 本实验亦可采用斩波器调制入射光波,用选频放大器测量光电探测器(硅光电池)的输出电压值(μ_U),以 μ_U 值表示光强 I_A 值.

在上述测量过程中,由于所测量的电流(电压)范围较宽,必须注意根据所测电流(或电压)的大小合理选用仪表的衰减器,选择适当的衰减倍数,测量电流(电压)最小值 $i_{min}(U_{min})$时,尤应注意,尽量选用较小的衰减倍数,以便读得精确数值.

三、观察电光调制现象

1. 画出观察电光调制现象时的有关电路图,用电子示波器观察 $i_A(t)$的波形.

2. 在电光晶体上只加直流电压,观察随着电压 U 的改变,$i_A(t)$如何改变? 如 $i_A(t)$内有交变成分(一般称纹波),查明它的原因.

3. 在电光晶体上加音频交变电信号时,观察 $i_A(t)$的波形,分下列三种情形:

(1) 工作点选在 $\delta=0$;

(2) 工作点选在 $\delta=\frac{\pi}{2}$;

(3) 改变调制电压值,观察 $i_A(t)$波形的变化情况.

4. 在电光晶体的前面(或后面)插入一个 1/4 波片,并使其快轴平行于电光晶体的 X 轴,则相当于加上了"光偏压",观察电光调制现象.

复习思考题

1. 为什么偏振片 P_1 的作用是减光器,输入电光调制器的入射光强的变化遵循什么规律? 说明之.

2. 为什么调制器要选取 $\theta_P - \theta_X = 45°$? 怎样实施? 若偏离 45°,对实验有何影响?

3. 如何保证光束正入射于晶体的端面,怎样检查判断? 不正入射,有什么影响?

附录 A-1　光学实验常用的电光源

光源，通常是指一切发光物体的总称．光源从其存在方式可以分为天然光源（如太阳光）和人造光源（如各种电灯）两大类，从光源的几何尺寸，可分为点光源和面光源，从能量转换的来源，又可区分为电光源（利用电能转换为光能），生物光源（荧光）和化学光源……，而从发光的物理机制来区分，则有受激辐射光源（如 He-Ne 激光）和自发辐射光源（如一切电光源）或称为相干光源和非相干光源；若从使用光波波长的特性来区分，常用的光源又有线谱光源（如汞灯）和连续谱光源（如炽热的钨丝灯）之分，实验室里常用的各种光源均属人造光源，而且是利用电能转换为光能的人造光源，故称为电光源．电光源的种类极其繁多，形状千差万别，而应用又十分广泛．下面将摘要介绍几种电光源及其构造原理和选择使用的注意事项．

一、热辐射光源

它是根据热辐射原理制成的．日常照明用的钨丝白炽灯，就是靠电能将灯丝加热至白炽状态而发光的热辐射光源，灯丝在将电能转变成可见光的同时，还要产生大量的红外辐射和少量的紫外辐射，不少电能以热的形式损失掉了．为了提高灯的发光效率，就要尽可能减少热损失．为此，应选用高熔点材料作灯丝，并使其工作于尽可能高的温度．钨的熔点虽为 3 655 K，但当温度很高时，钨在真空中很易蒸发，这就缩短了使用寿命，必须设法减少钨丝的蒸发．灯泡内充入氩、氮等惰性气体，可以有效地抑制钨的蒸发，从而使工作温度提高到 2 700～3 000 K，但充气后造成附加的气体传导和对流的热损失，故发光效率提高不多．

图 A-1-1 所示为一种钨丝白炽灯的结构．它的泡壳本身就是一个光学系统，使灯丝发出的光能有聚焦作用．泡壳由两部分

组成，一部分是椭球面，另一部分是球面，在两部分的内壁上蒸镀了铝膜，只有球面部分的当中留下一个平面小窗口，灯丝位于球面的球心和椭球面的物方焦点上，它发出的光一部分经椭球面反射成像于像方焦点，另外除有一部分直接通过窗口外，还有一部分经球面反射回灯丝，再经椭球面反射会聚到像方焦点上. 流动式的放映机大多采用这种灯泡作为放映光源.

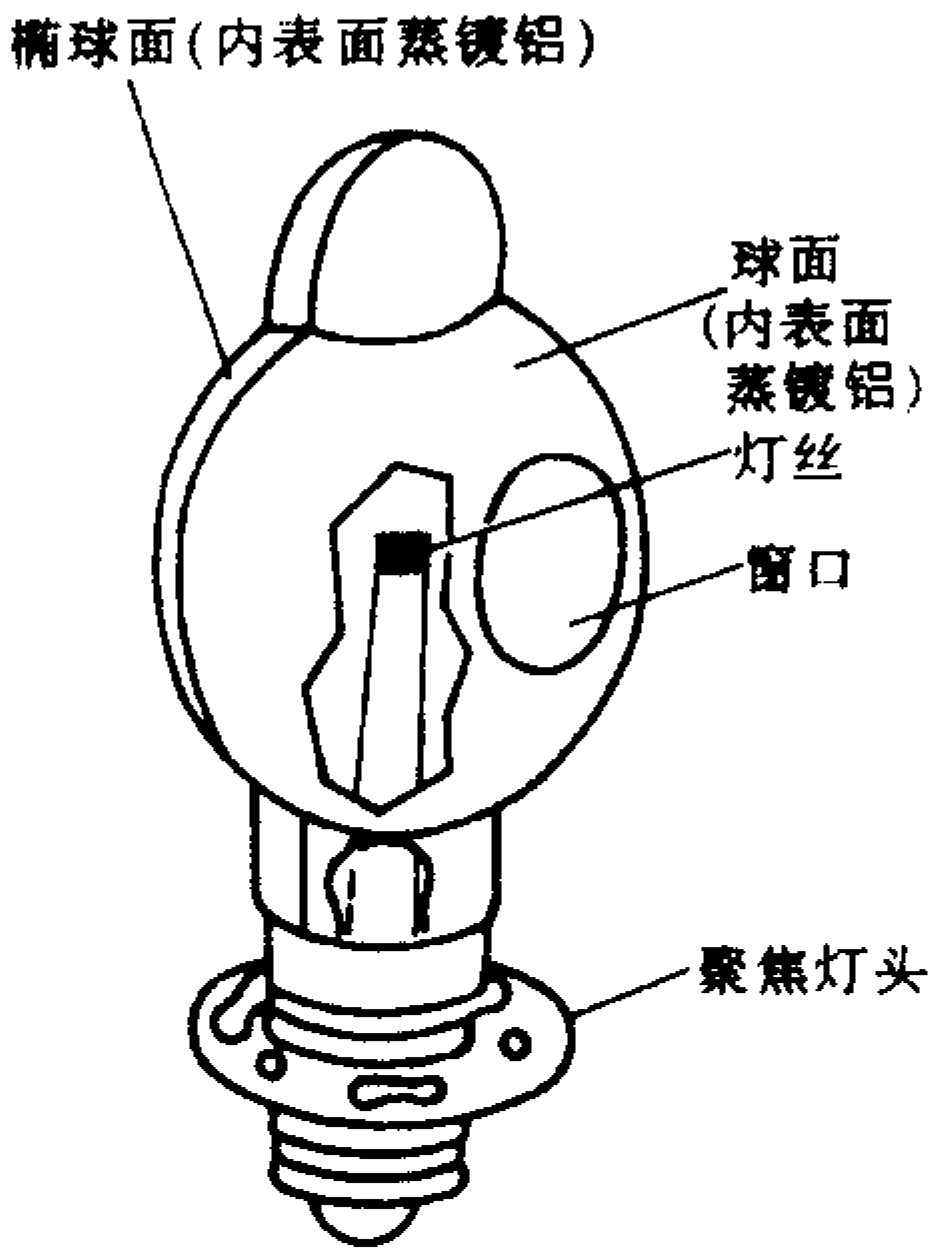


图 A-1-1

若在钨丝灯泡内加入微量的卤族元素碘或溴，制成碘钨灯和溴钨灯，利用卤钨循环原理能够更有效地抑制钨的蒸发. 卤钨循环的过程是这样的，在适当的温度条件下，从灯丝蒸发出来的钨与卤族元素在泡壳附近发生化学反应，生成挥发性的卤钨化合物，这些化合物，在泡壳附近有较高的浓度，因而向浓度相对较低的区域扩散. 当卤钨化合物扩散到较热的灯丝周围，被分解为卤素和钨，释放出来的钨沉积在钨丝上，或重新向泡壁扩散. 在上述过程中，卤素原子和钨原子反应的基本形式为



$$W + nX \rightleftharpoons WX_n$$

符号 W 及 X 分别表示钨及卤素原子，n 为原子的数目. 由于卤钨循环有效地控制了钨丝的蒸发，因而大大提高了发光效率，也延长了使用寿命. 所以碘钨灯和溴钨灯常被用作强光源，广泛应用于摄影、放映电影和幻灯等. 实验室用的管状碘钨灯和立式溴钨灯的结构分别如图 A-1-2(a)和(b)所示.

钨丝灯除了用作照明外，由于它在近红外和可见光区辐射出很强的连续光谱，故在可见和近红外光谱研究中，常用钨丝灯作光源；由于钨丝白炽灯工作状态较为稳定，使用寿命较长，用黑体辐射源校准后，在光度学测量中，常作为比较用的发光强度标准灯和

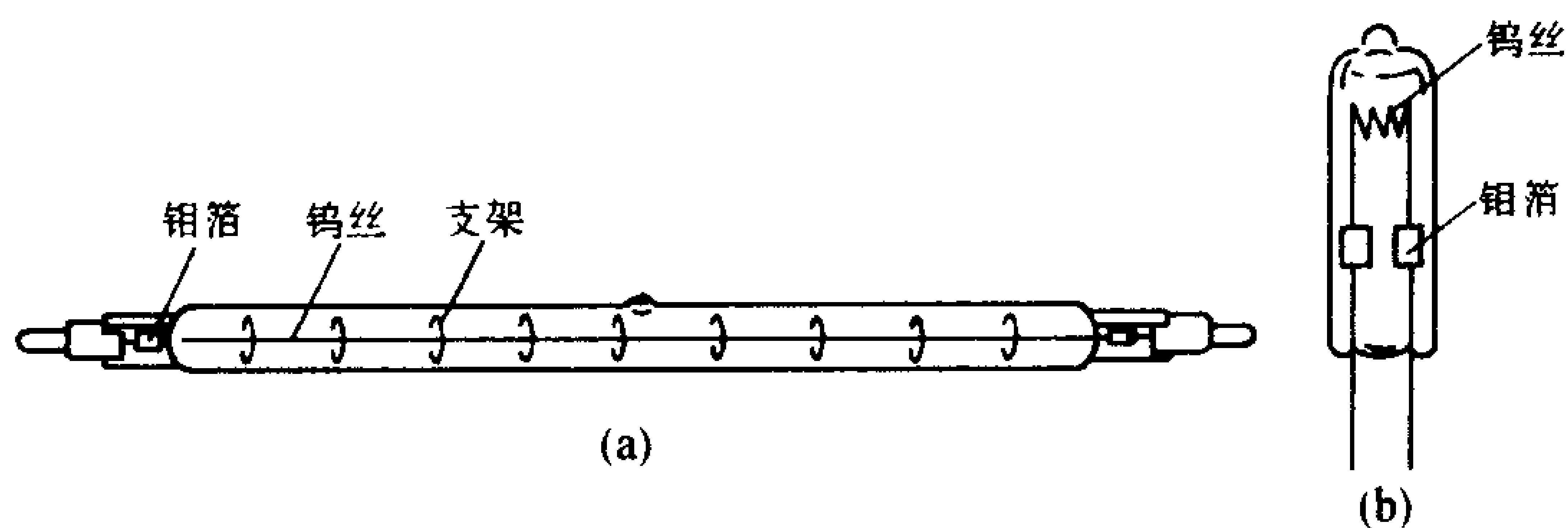


图 A－1－2

光通量标准灯，国产的两种标准灯[①]的特性见表 A－1－1 和表 A－1－2.

表 A－1－1　国产发光强度标准灯的特性

型号	电压/V	电流/A	功率/W	发光强度/cd	充气	色温/K
BZ 1	10	0.75	7.5	5	真空	2 356
BZ 2	10	1.4	14	10	真空	2 356
BZ 3	107	0.485	51.8	35	真空	2 356
BZ 4	107	0.54	57.8	35	真空	2 356
BZ 5	107	1.38	148	100	真空	2 356
BZ 6	107	3.36	360	500	充气	2 859
BZ 7	107	6.25	670	100	充气	2 859

表 A－1－2　国产光通量标准灯特性

型号	电压/V	电流/A	功率/W	光通量/lm	充气	色温/K
BZ 8	35	0.538	18.8	150	真空	2 356
BZ 9	107	0.584	62.5	500	真空	2 356
BZ 10	107	1.65	177	1500	真空	2 356
BZ 11	107	1.17	125	1500	充气	2 793
BZ 12	107	2.34	250	3500	充气	2 793

表中数值是参考值，每只灯的光电参量在出厂时都根据实测

① 均为上海亚明灯泡厂生产.

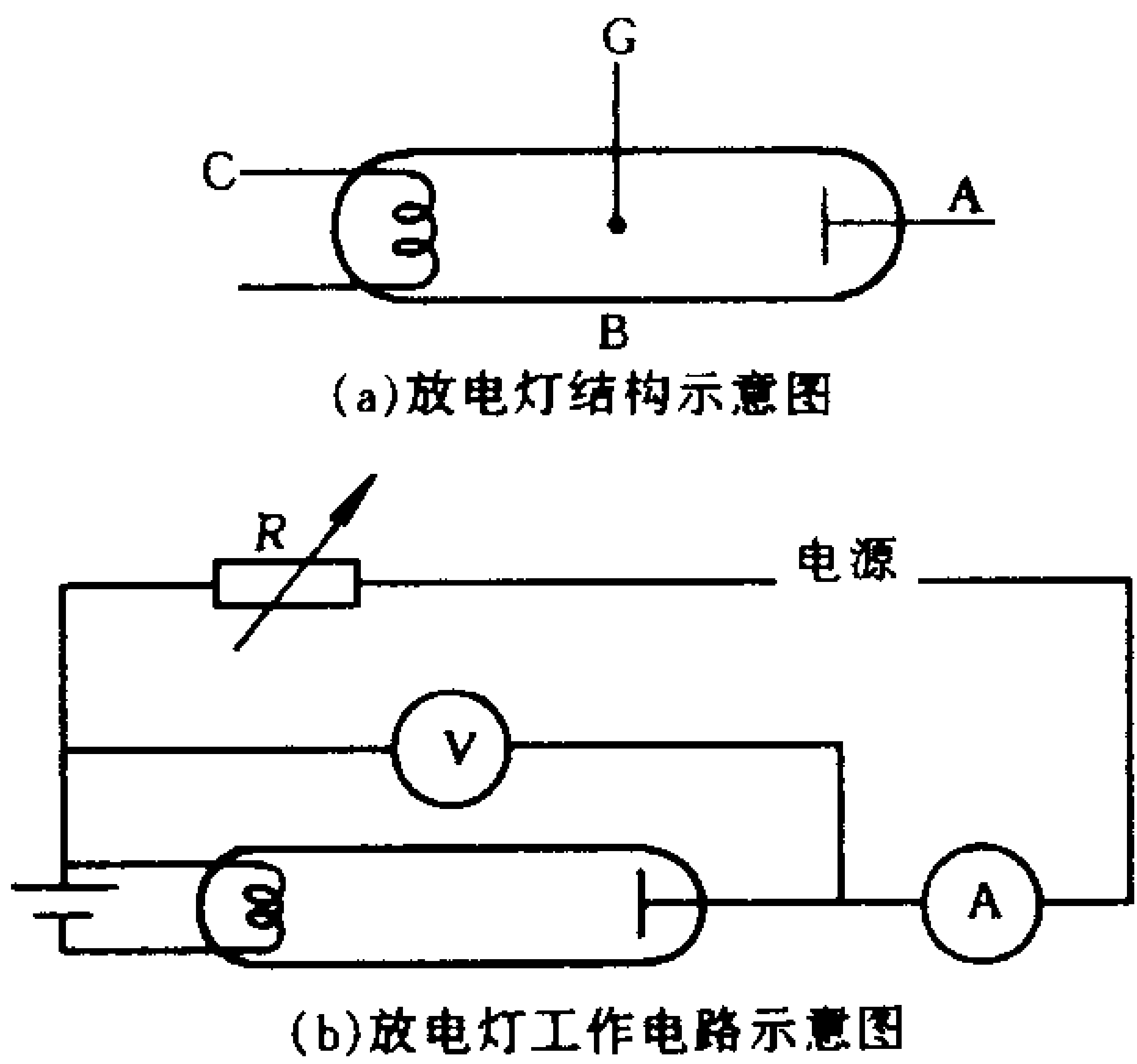
值分别注明，国产的标准灯均以工作电流为准，对电源的要求较高，必须使用稳压和稳流电源供电.

二、气体放电光源

光学实验室中大量使用的光源是各种气体放电灯，气体放电灯的工作过程就是电流通过气体介质时放电发光的过程. 气体放电的种类很多，在光源中，用得最多的是辉光放电和弧光放电.

1. 气体放电的全伏－安特性

气体放电灯的基本结构和工作原理，可用示意图 A－1－3 来说明. 图 A－1－3(a)中 B 是灯管(放电管)的泡壳，通常由透明的玻璃或石英加工而成，A 和 C 是灯管的阳极和阴极(系对直流工作而言，在交流工作时，两极交替作为阴、阳极使用)；G 代表密封在灯管中的气体，如果灯管按图A－1－3(b)所示接入电路，则在



(a)放电灯结构示意图

(b)放电灯工作电路示意图

图 A－1－3

一定的电压下，灯管就会放电发光. 发光的基本过程可分三步：电子的发射(热阴极或冷阴极)和被两极间的电场加速；高速运动的电子和气体原子碰撞时，电子的动能就转移给气体原子使其激发；当受激原子返回基态时，所吸收的能量以幅射(发光)形式释放出来. 电子的不断产生和被电场加速，就使这过程不断地进行下去，

根据所充气体的类别而发射其特有的原子光谱或分子光谱.

在图 A-1-3 中,如果改变电源电压 U_0,测量在不同的放电电流 I 时的灯管电压 U,就可得到如图 A-1-4 所示的曲线,此曲线称为气体放电的全伏-安特性曲线.

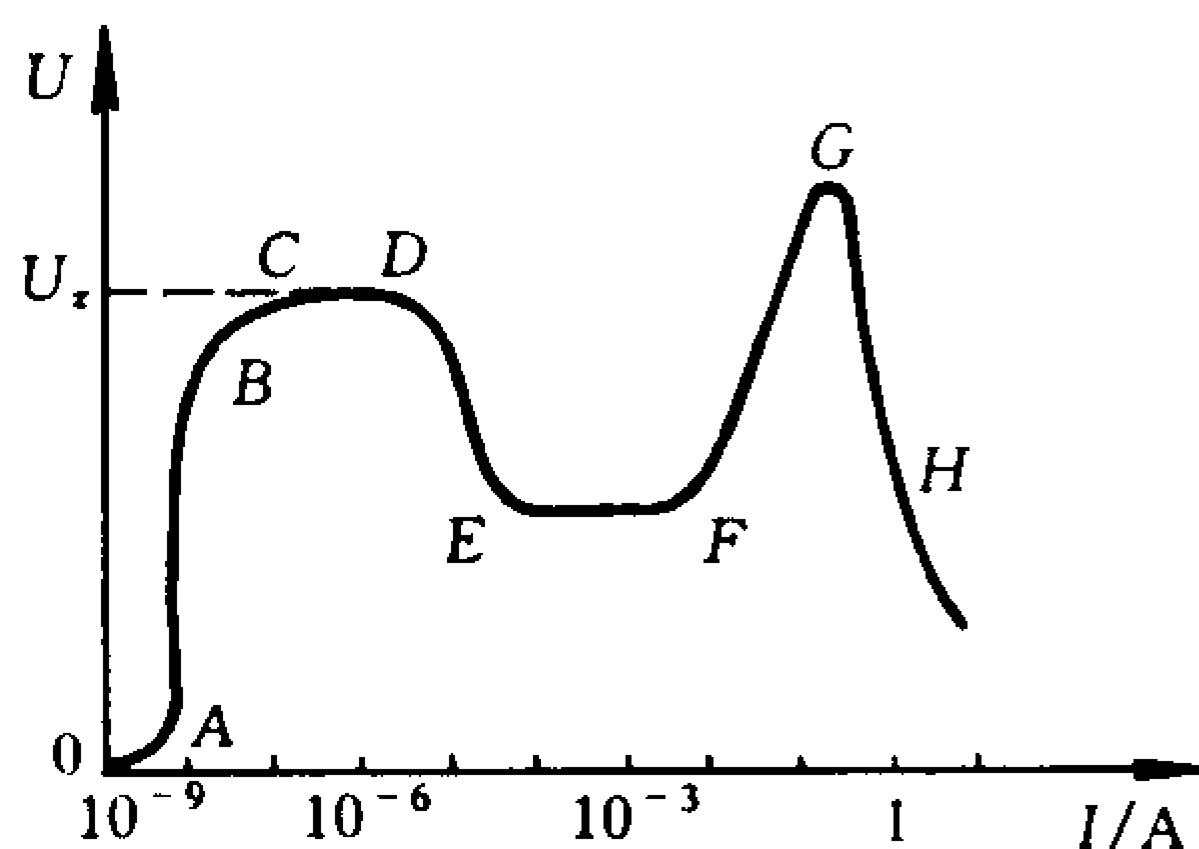


图 A-1-4

气体放电的全伏-安特性曲线的各段情况是这样的. 由于外致电离,在灯管中存在带电粒子,在电场作用下,这些带电粒子向电极运动,形成电流,随着电场的增强,带电粒子的速度增加,复合减少,使电流增大,这就是 OA 段. 当电场再增强时,所有外致电离产生的带电粒子全部到达电极,这时电流就饱和了,形成了 AB 段. 如果电压 U_0 再继续升高,则电场将使初始的带电粒子的速度增加到很大,它们与中性原子碰撞时能使之电离,而中性原子电离产生的电子又被电场加速去和另外一些中性原子作电离碰撞,形成更多的电子. 这样一种繁衍过程使电子数雪崩式地增加,因此称 BD 段为繁流放电或雪崩放电. 在 D 点,通过灯管的电流突然增加,管压随即迅速降低,同时在灯管中产生了可见的光辉. D 点称为气体放电的破裂点或着火点,相应的电压 U_z 则称为灯管的着火电压. 在 EF 段无论增加 U_0 还是减小回路电阻 R,使电流增加,管压降基本不变. 这一段称为正常辉光放电. 正常辉光放电时,管压降能维持不变是因为在这个范围内阴极并没有全部用于发射电子,用于发射的面积正比于电流,故这时阴极上的电流密

度是一常量. 当整个阴极面都用于发射(即 F 点)之后,如果还继续增大电流,阴极电流密度就必须增加,造成管压升高,这样就进入异常辉光放电阶段 FG. 其后,如果再使放电电流增加,由于电极温度升高转入热电子发射,特性又一次发生突变,管压大幅度降低,电流迅速增加,这就形成了弧光放电的 GH 段.

在 OC 段放电是非自持的,如果除去外致电离,则放电立即停止. C 点以后的放电是自持的,当放电电流增加到足够的空间电荷积累后,达到着火点 D. 从 E 点开始,以后都是稳定的自持放电. 非自持放电也称为黑暗放电. 从图 A-1-4 上可以看出,黑暗放电电流大约在 10^{-6}A 以下,辉光放电电流为 $10^{-6}\sim10^{-1}$A,而弧光放电的电流约在 10^{-1}A 以上.

2. 灯的稳定

图 A-1-4 的 GH 段表明,一般说来弧光放电具有负的伏-安特性. 即电压随电流增加而减小,能表示许多电弧特性的经验方程可以写成

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I} \qquad (\text{A}-1-1)$$

式中,U 是电弧电压,I 是电弧电流,l 是电弧长度,a、b、c、d 是与气体性质和电极性质有关的常量.

具有负伏-安特性的器件单独接入电路中,工作肯定是不稳定的,假定这一器件如图 A-1-5 曲线 a 那样,工作于某一确定的电压 U_1,流过器件的电流是 I_1,如果由于某种偶然原因,电流由 I_1 瞬时地增加到 I_2,这时就产生一个过剩的电压 U_1-U_2,它将使电流进一步地增加,直到灯或电路的某一部分被过载电流烧毁为止. 同样,当电流从 I_1 瞬时地减小为 I_3,这时要维持 I_3 不变,电压的差额为 U_3-U_1,这又将导致电流进一步减小,使灯管自动熄灭.

为克服放电工作的不稳定性,可以用电阻与灯串联起来使用,电阻的伏-安特性如图 A-1-5 中曲线 b 所示,将电弧与电阻的

伏－安曲线叠加起来，不难看出，曲线 c 则具有正的伏－安特性，放电灯方可稳定地工作．在交流情况下，可以用电感或电容来代替电阻，与放电灯串联的电阻或电感等统称为镇流器或限流器．由于电阻在电路中要消耗能量，所以只应用于小功率的气体放电灯．如 8 W 日光灯，即由涂布于放电管壁的一层四氯化锡薄膜电阻起镇流作用．一般交流放电灯在低频时均使用电感作为镇流器．

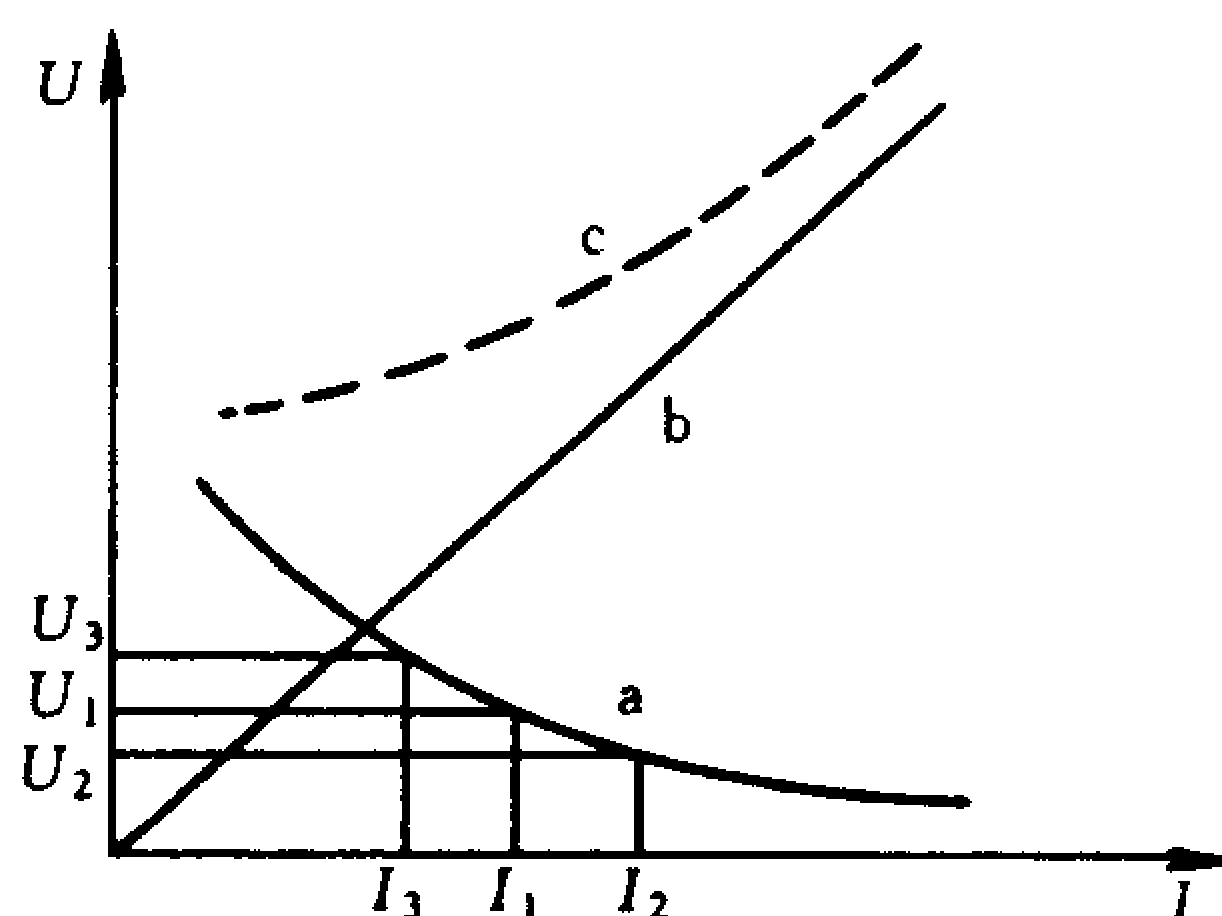


图 A－1－5

在市电频率下，通常采用电感镇流．这种电感镇流器有许多缺点：①功耗大，40 W 荧光灯镇流器的损耗达 6～8 W；②功率因数低；③重量大、体积大；④低频噪声等．其中大部分缺点都与供电频率低有关．随着供电频率的升高，电感器的感抗正比增大，镇流器的体积和重量可大大减小，损耗也可降低．如频率足够高，低频噪音、光闪烁也均可避免，而且灯的发光效率可进一步提高．电子镇流器，就是用电子元件组成的变换器，将市电变为高频，然后经 *LC* 电路串联后对灯供电．其原理方框图如图 A－1－6 所示．由整流电路、高频发生器及谐振电路这三个主要部件构成．根据使用的需要，还可附加滤波电路、干扰抑制电路和控制电路．

电子镇流器的功耗可比普通电感镇流器小 50% 以上，灯管效

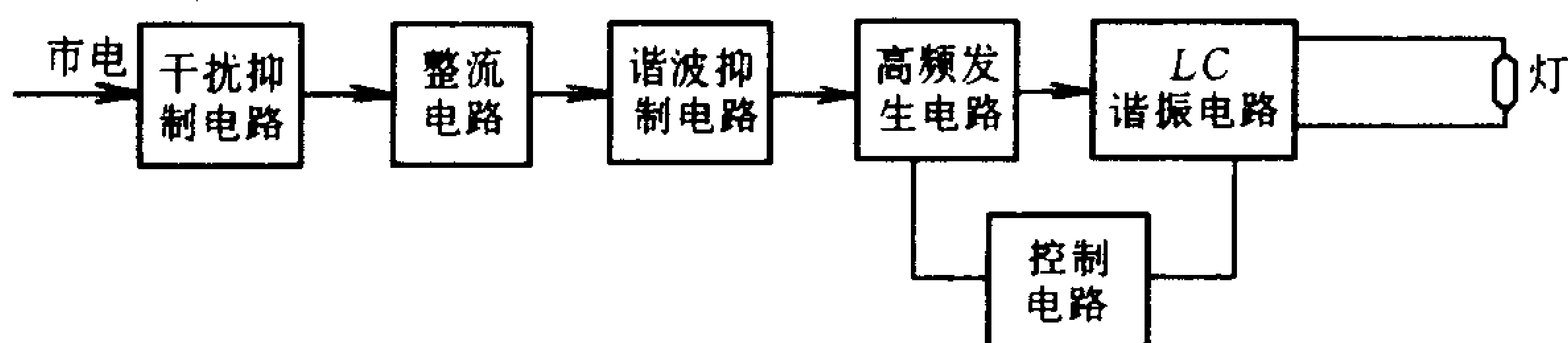


图 A－1－6

率提高10％左右.所以在采用电子镇流器后,灯的总体效率提高25％以上.此外,电子镇流器还有重量轻、体积小、无闪烁、无噪音、可快速启动、有高功率因数等优点.

3. 几种常用的气体放电灯

(1) 辉光放电管

辉光放电管是利用气体辉光放电发光的光源,又称光谱管.通常在小于 10^3Pa 及较小的电流密度下工作,其典型结构如图 A－1－7 所示.管内充有气体,点燃时发出所充气体的特征光谱,其光谱线很锐细,适于作光谱波长标准的参考,几种气体放电管发射的光谱线波长参见附录表 A－2－3.

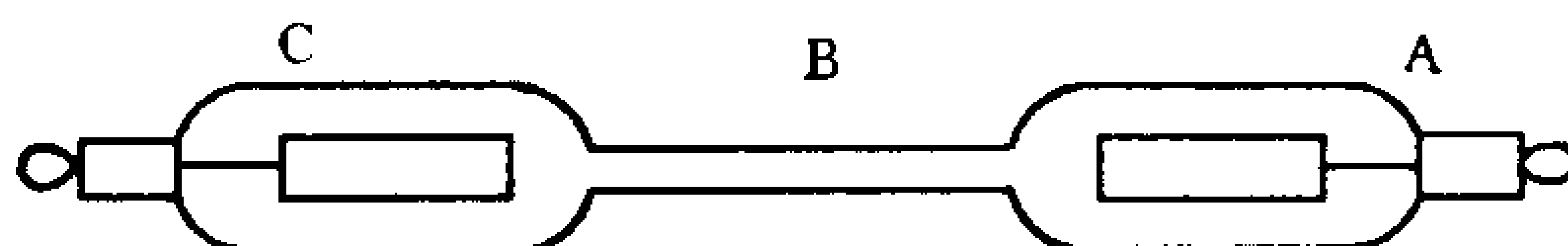


图 A－1－7

辉光放电管需用高压电源(5 000～15 000 V)才能点亮,实验室中常用感应圈作电源.图 A－1－8 为感应圈工作原理图.当电源开关 K 闭合时,利用电磁断续器 M,接通或断开初级线圈 L 回路,在次级线圈 H 两端感生电势,因 H 的匝数远大于 L 的匝数,所以产生的脉动直流高压可达万伏以上.断路时在断开处会产生火花.

(2) 氢灯

又称氢放电管;是实验室常用的一种原子光谱灯.其构造和工作电路如图 A－1－9 所示.用毛细管把两个大玻璃管连通,管

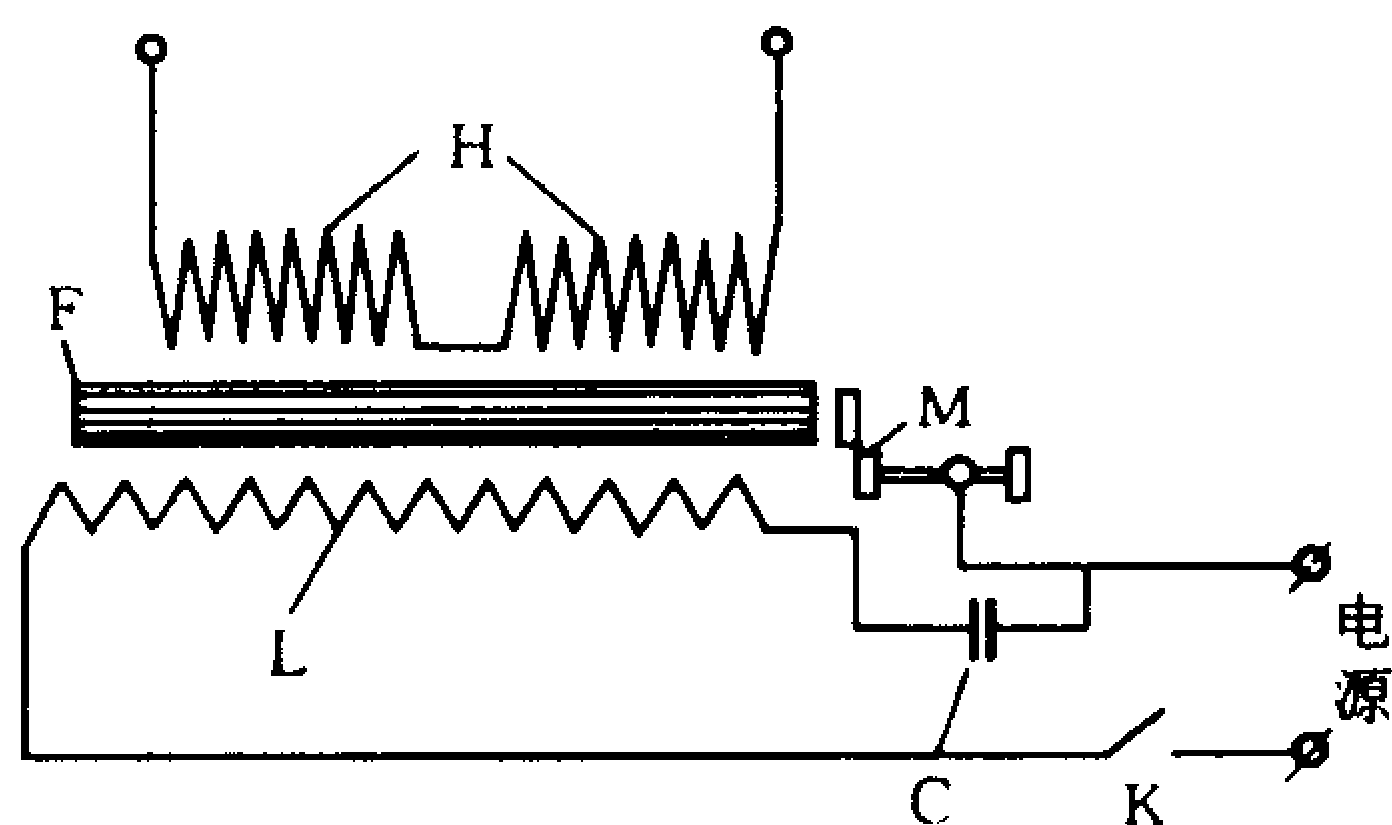


图 A－1－8

内充以氢气．放电时发出粉红色的光，其中除原子光谱外，也包含有分子光谱，两者往往同时出现．使用时，工作电源为霓虹灯变压器．灯管的工作电流为几毫安，管压为几千伏．因霓虹灯变压器的次级线圈具有很大的电感，故不须另用限流器．表 A－1－3 列出 GP10H 型氢灯的技术数据①．

表 A－1－3 氢灯规格与主要技术参量

型号	功率/W	起辉电压/V	工作电流/mA	主要尺寸/mm			外壳	备注
				全长	宽度	毛细管外径		
GP10H	10	8 000	15	200	130	7	玻璃	用霓虹灯变压器或漏磁变压器

(3) 低压汞灯

汞灯(又称水银灯)是利用汞蒸气放电而发光的灯的总称，辉光放电型的汞灯属于前述的汞光谱管；弧光放电型的汞灯通常简称汞灯，汞灯按其工作时的汞蒸气压的高低，又可分为低压汞灯、高压汞灯和超高压汞灯三种．

通常在小于 1.013×10^5Pa 下工作的汞灯称为低压汞灯．在汞蒸气压比较低时，汞原子被激到 $6\,^3P_1$ 能级的机会较多，处于激

① 该灯由上海电光器具厂生产．

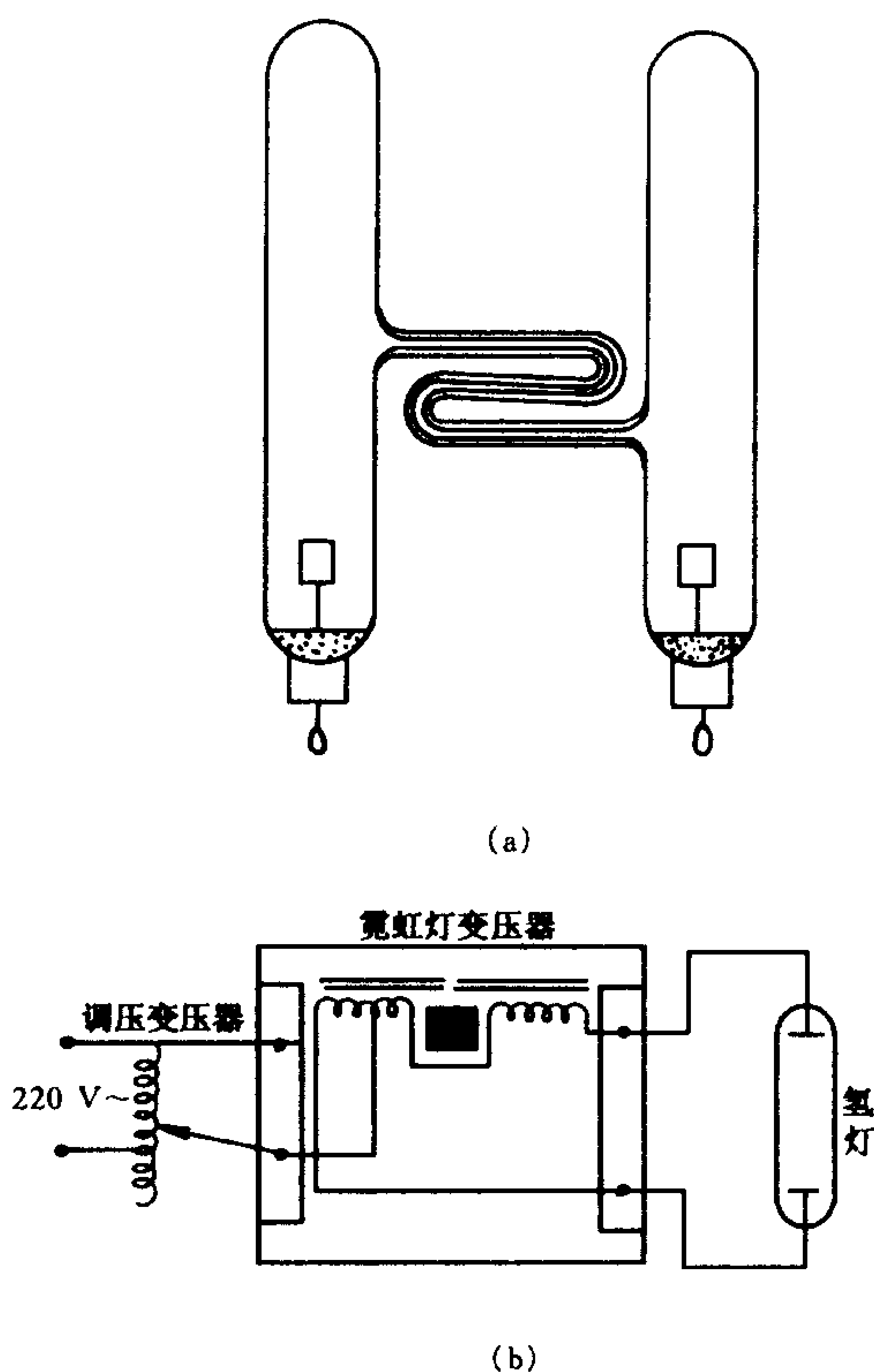


图 A-1-9

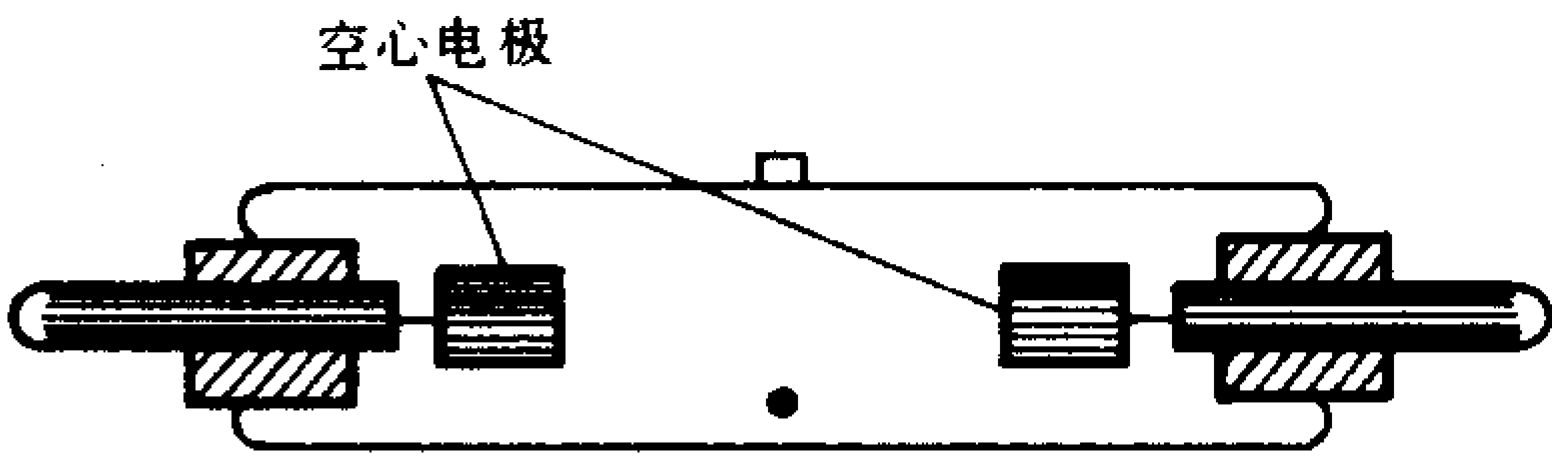
发态的原子在返回基态(6^1S_0)时,产生波长为 253.7 nm 的共振幅射. 当汞蒸气压为 0.8 Pa 时,这一波长的辐射效率最大,可达输入电能的 60%,故低压汞灯辐射能量几乎集中在 253.7 nm 这一谱线上,它只能作为紫外光源用.

当汞气压升高,低压汞灯在可见光区亦有特征谱线辐射,其中以波长为 404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm 的谱线最为明显,是实验室常用的复式单色光源. 当需要使用其中某一波长的单色光时,可通过适当的滤光片或分光装置而获得. GP 2Hg 型低压汞灯是用于紫外光区的低压汞灯,GP20Hg 型是用于可见光

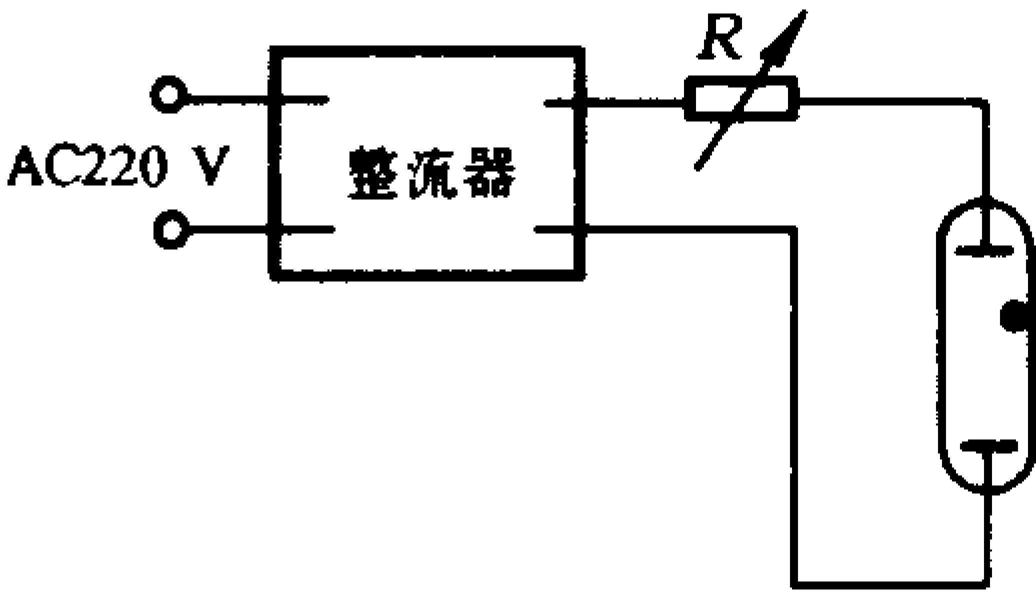
区的低压汞灯．表 A－1－4 列出它们[①]的主要参量．图 A－1－10 所示为 GP 2Hg 型低压汞灯的结构和工作电路图．交流电源工作时，其电路与图 A－1－9(b)相似，应用直流电源工作时，其电路如图 A－1－10(b)所示．整流器输出在 700 V 左右，电路中串联一电阻 R，以稳定和限制其工作电流，使电弧稳定．

表 A－1－4　低压汞灯的主要参量

型　　号	主谱线波长/nm	电源电压/V		工作电流/mA	工作电压/V
GP 2Hg	253.7	A.C. 220	D.C. 700	4～10	150
GP 20Hg	404.7 435.8 546.1 577.0 579.1	A.C. 220		1 300	20



(a)



(b)

图 A－1－10

① 均为上海电光器具厂生产．

(4) 高压汞灯

增加管内汞蒸气压可提高灯的发光效率,从而大大提高灯的亮度,并且会有更多的谱线被激发,高压汞灯的蒸气压可采用几个大气压,甚至几十个大气压,25×10^5 Pa 以上的汞灯称为超高压汞灯. 一般的高压汞灯的构造如图 A-1-11(a)所示. 在真空的圆柱形石英管的两端各有一主电极,在一个主电极旁还有一辅助电极,为了使主电极易于放出热电子,主电极上涂有氧化物,管内充有汞和少量氩气,在石英管外还有一硬质玻璃外壳,起保温和保护作用. 高压汞灯的工作电路如图 A-1-11(b)所示,辅助电极通过一只 40~60 kΩ 的高电阻 R 与不相邻的主电极相接. 当汞灯接入电路后,辅助电极与相邻主电极之间加有交流 220 V 的电压,由于这两个电极之间的距离很近(通常只有 2~3 mm),所以它们之间有很强的电场,在此强电场作用下,两电极间气体被击穿,发生辉光放电. 放电电流由电阻 R 限制. 辉光放电产生了大量的电子和离子,这些带电粒子在两主极电场作用下,很快产生繁流过程,并过渡到两主电极之间的弧光放电. 刚点燃时,是低压汞蒸气和氩气放电,随着灯管温度升高,汞逐渐气化,汞蒸气压和灯管电压逐渐升高,放电逐步过渡到高(气)压电弧放电,当汞全部蒸发后,管压开始稳定,灯管正常发光. 由此可见,高压汞灯从启动到正常工作需要一段预热、点燃时间. 通常约需 5~10 min,启动电流都比工作电流大. 高压汞灯熄灭后,不能立即启动,因为灯熄灭后,内部还保持着较高的汞蒸气压,要等灯管冷却,汞蒸气凝结后才能再次点燃,冷却过程亦需要 5~10 min. 高压汞灯的电源可以使用 220 V 的交流电. 为了克服气体弧光放电过程中负的电阻效应,即随着管中电流的增加,管压下降,引起电流进一步增大,使灯管不能稳定工作甚至烧毁,在电路中应根据灯管工作电流,选用适当的限流器 L,以稳定灯的工作电流. 几种国产的高压汞灯[①]规格

---

① 由上海电光器具厂生产.

见表 A－1－5.

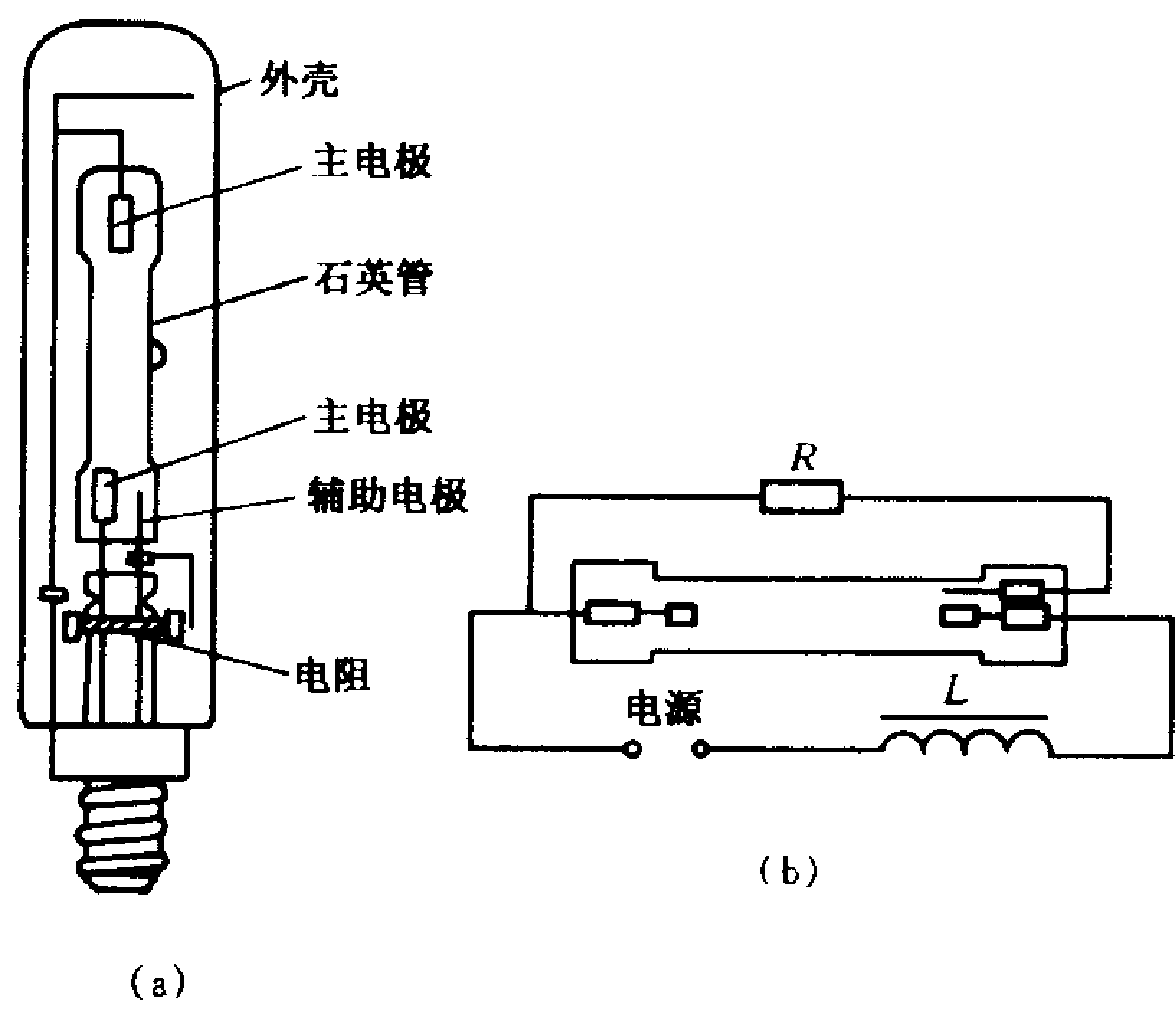


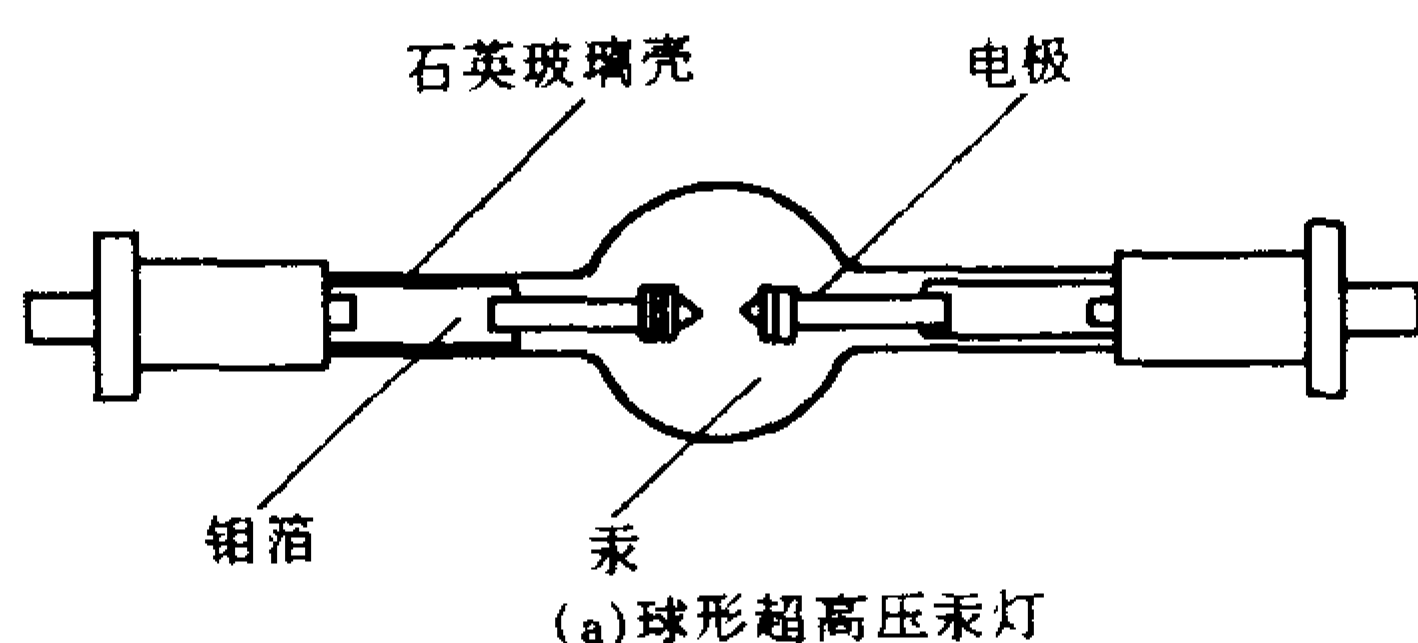
图 A－1－11

表 A－1－5　高压汞灯的主要参量

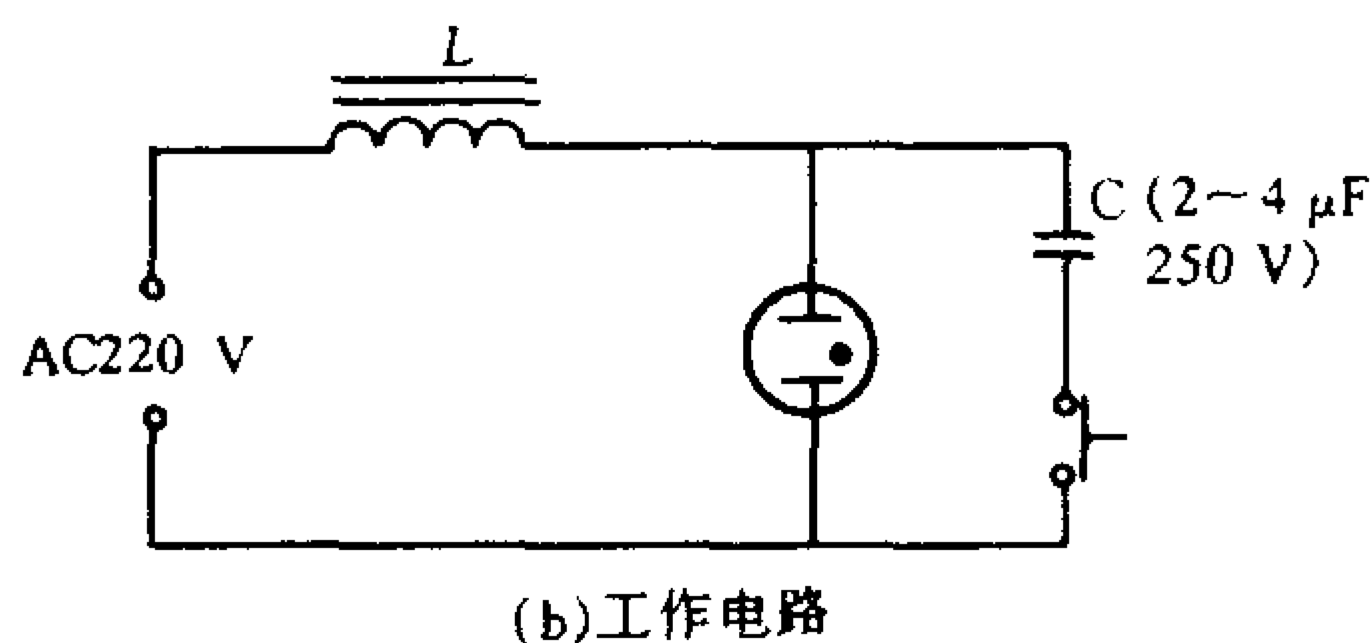
型　　号	功率 / W	工作电压 / V	工作电流 / A	启动电流 / A	外　径 / mm	极　距 / mm	备　　注
GGQ 50	50	95	0.62	1.0			仪器用
GGQ 80	80	110	0.85	1.3			
GGH 120	120	115	1.1	1.8	10	30	作光谱灯及荧光分析用
GGZ 125	125	115	1.2	1.8	10	30	
GGZ 300	300	120	2.3	3.8～4.5	18	102	紫外线照射用
GGZ 500	500	125	2.4	6.5～7.0	20	152	

超高压汞灯的结构和特性与高压汞灯有很多不同. 图 A－1－12 为球形超高压汞灯的结构和工作电路图. 随着汞蒸气压的提高,原子激发到高能级的概率增大,紫外辐射减弱,可见光区发射的谱线展宽,并大大增强,所以可作为各种光学仪器和投影系统的高亮度光源,国产超高压汞灯①的主要参量列于表 A－1－6 中.

① 由上海电光器具厂生产.



(a)球形超高压汞灯



(b)工作电路

图 A-1-12

表 A-1-6　球形超高压汞灯的主要参量

型　　号	功率/W	电源电压/V	工作电压/V	工作电流/A	启动电流/A	光通量/lm
GCQ 50	50	～220	～35	1.5		
GCQ 75	75	～220	～52±5	1.5	2.5	2 500
GCQ 200	200	～220	～55	3.9		
GCQ 400	400	50	25～30	12～16	<30	20 000

(5) 低压水银荧光灯

这种灯是在低压汞灯的管壁内涂上一层荧光粉，灯点亮后，汞蒸气发出的紫外线照射在荧光物质上，使其发射出波长较长的可见光，选配适当的荧光物质，可使它发出的光色与日光相近，所以俗称日光灯．日光灯光线柔和而明亮，常用作照明光源．日光灯在可见光区辐射连续光谱，在此背景上汞的四根特征谱线尤为显著，所以有时也可代替汞灯使用．

日光灯的启动大多采用预热式，其电路如图 A-1-13 所示．当电源接通时，起辉器(氖泡)辉光放电，使泡内双金属片受热伸展

而和固定电极接触连通，于是电流通过氖泡和限流器 L 加热灯丝，涂有氧化物的灯丝便发射出大量电子，使灯的起动电压大大降低．同时，当氖泡停止放电而冷却时，双金属片恢复原状，当双金属片和固定电极断开时，限流器产生的高压自感电势使水银荧光灯点燃放电而发光．此时氖泡两端电压已降到放电电压(130 V)以下，不再起辉，除非水银荧光灯熄灭后，再行点燃时才又起作用．国产低压水银荧光灯的主要参量如表 A－1－7 所列．

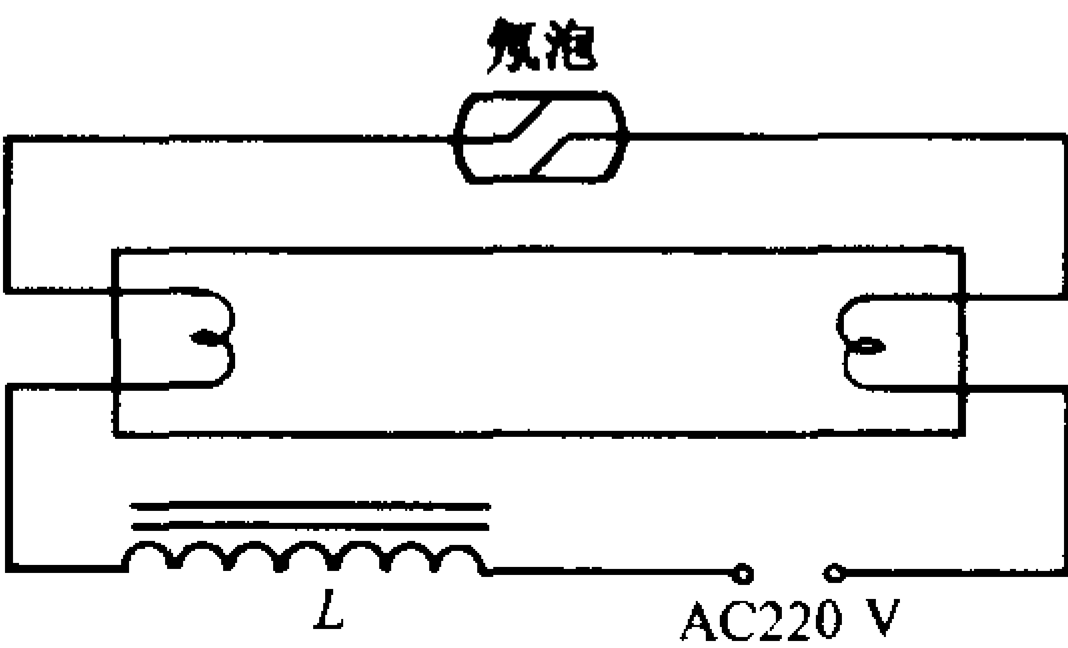


图 A－1－13

表 A－1－7　低压水银荧光灯主要参量

灯管型号	额定功率 W	启动电流 mA	工作电流 mA	灯管压降 V	光通量 lm	平均寿命 h	灯管形状，用途
YZ 6	6		135±5	55	150	1 000	直管形，照明
YZ 8	8		145±5	65	250	1 000	直管形，照明
YZ 20	20	460	350	60	970	3 000	直管形，照明
YZ 30	30	560	350	95	1 550	3 000	直管形，照明
YZ 40	40	650	410	108	2 400	3 000	直管形，照明

(6) 钠灯

钠灯分低压钠灯和高压钠灯两种，其工作原理和汞灯相似，都是金属蒸气的弧光放电．低压钠灯的实际结构和工作电路如图 A－1－14 所示．几种国产低压钠灯①的规格和参量见表 A－1－8．

① 该灯由上海电光仪器厂生产．

表 A-1-8　低压钠灯的主要参量

型　　号	功率/W	工作电压/V	工作电流/A	启动电压/V	极间距/mm
GP 20Na	20	20	1.3	220	
N45	45	80	0.6	470	260
N75	75	120	0.6	470	
N140	140	160	0.9	470	810

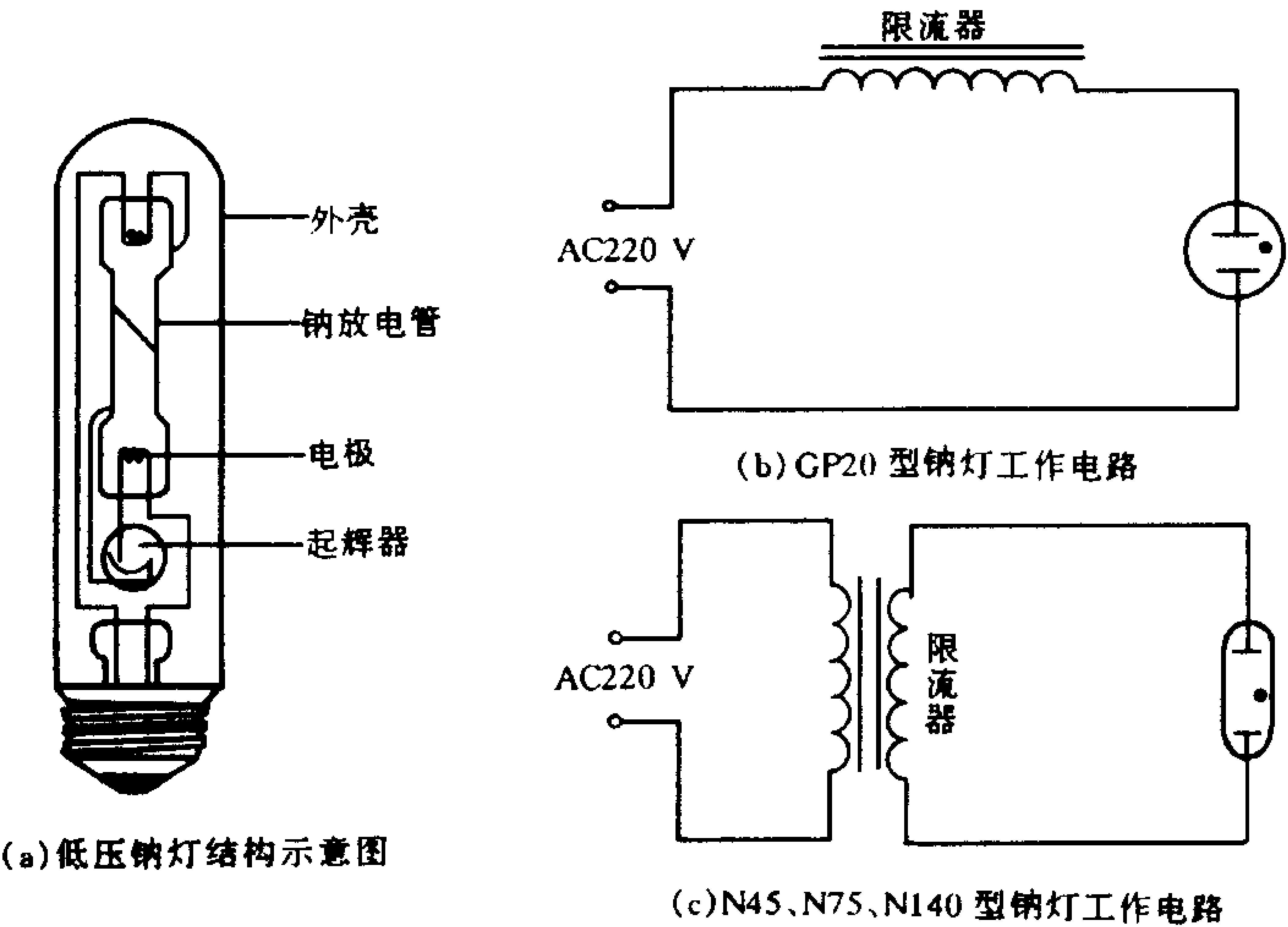


图 A-1-14

低压钠灯工作时,在可见光区发射出两条极强的黄色谱线(又称D线),它们的波长分别为 589.0 nm(D_2)及 589.6 nm(D_1),通常取它们的中心近似值 589.3 nm 作为黄光的标准参考波长,许多光学常量的测定均以它作为基准,因此钠灯是实验室中最重要的单色光源之一.

高压钠灯辐射光谱中的D线,随钠蒸气压的升高,会因自吸收而消失外,还辐射 454 nm、467 nm、498 nm、515 nm、586 nm 和 615 nm 等可见谱线以及红外线 818 nm、1 138 nm 等. 400 W 高压

钠灯约产生红外辐射 80 W,可见辐射 118 W,紫外辐射 2 W,总计辐射功率 200 W,光辐射功率 176 W,其余 24 W 是电极损耗.

小功率的低压钠灯主要应用于光学仪器中,45 W 以上的低压钠灯和高压钠灯,则主要用于照明,因为钠灯的发光效率可高达 120 lm/W 以上. 但是由于钠灯辐射的单色性强,几乎完全是黄光,显色效果较差.

上述电弧灯如充以其它金属蒸气,例如镉、铊、锌、铯、钾等蒸气,就可制成各种金属蒸气弧光灯,镉灯有一条很锐细的红色特征谱线 463.846 96 nm,曾被采用为波长的原始标准,现在仍常常作定标用.

三、激光光源

激光器是 60 年代初出现的一种新型光源,已被广泛应用于物理实验室. 激光器的发光机理和普通光源根本不同,激光器是受激发射发光,普通光源则是自发发射而发光. 激光器发出的光束(激光)传播时有极强的方向性,即光束的发散角很小;有极好的单色性和相干性;输出的功率虽然有限,但功率密度大,即能量高度集中. 因此实验室中常用它作为强的定向光源和单色光源.

普通物理实验中最常用的激光器是氦－氖激光器,它是一个气体放电管[图A－1－15(a)],管内充有氦氖混合气体,两端用镀

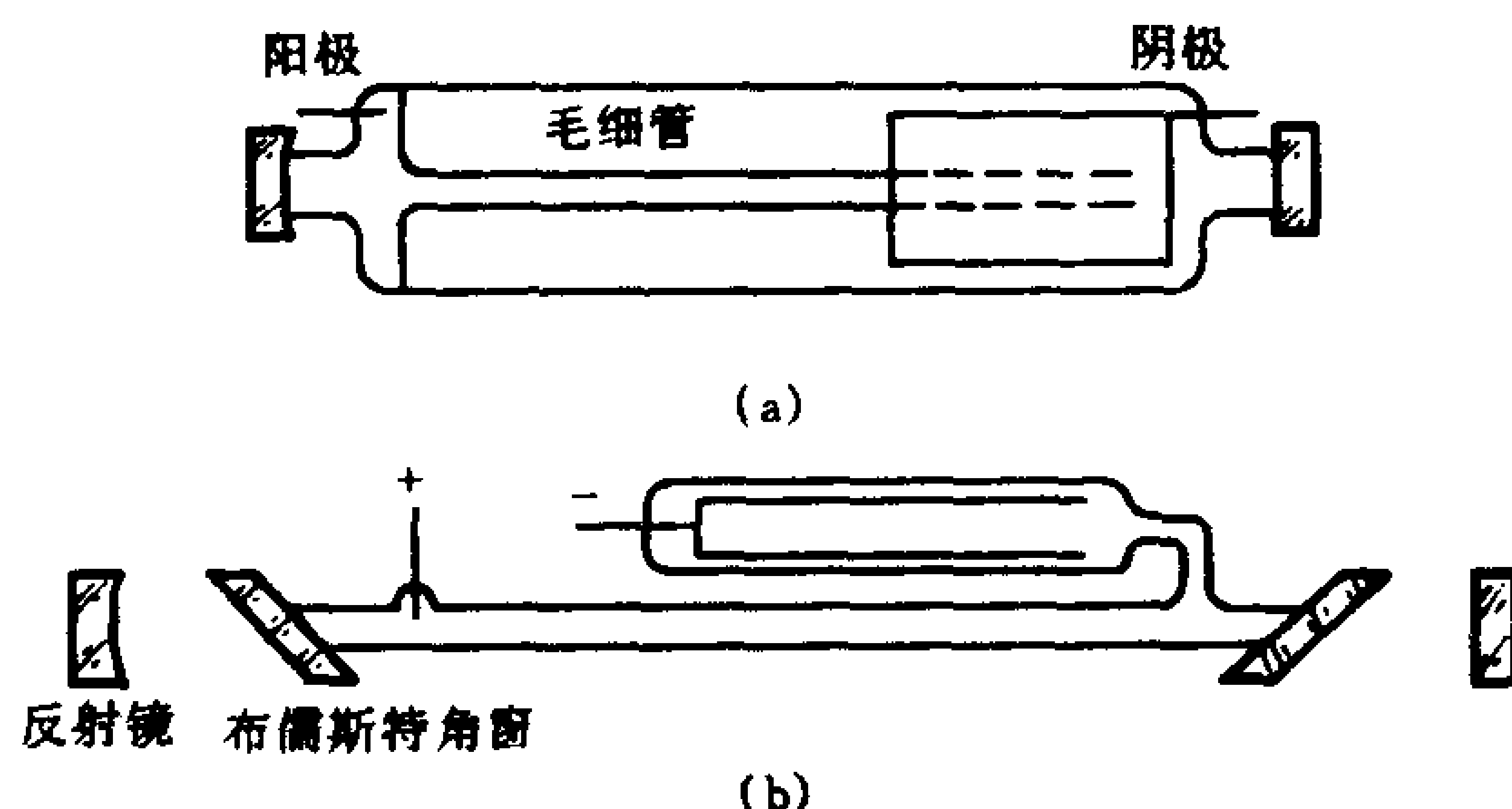


图 A－1－15

有多层介质膜的反射镜封固，构成谐振腔，光在两镜面间多次反射，形成持续振荡．有的激光器将反射镜安装在管外[如图 A-1-15(b)所示]，以便调节与更换．如果使放电管的窗口与管轴成布儒斯特角，那么发出的光是完全偏振光．

氦、氖混合气体的能级如图 A-1-16 所示，由激光管放电产生的高能电子，冲击氦原子使它从基态激发到亚稳态 2^3S 及 2^1S，这两个能级很接近氖的 $2S_2$ 和 $3S_2$ 能级，因而很容易发生能量交换，当激发态的氦原子去碰撞基态氖原子时，能量便由亚稳态的氦原子转移给基态的氖原子，并使氖原子由基态激发到 $2S_2$ 和 $3S_2$ 态，氦原子便失去能量返回基态，这样就可使氖的 2S 与 3S 态的原子数与 P 态的原子数形成反转分布，即高能级的原子数多于低能级的原子数，这将使受激发射占优势，从而产生 3.39 μm、1.15 μm 及 0.632 8 μm 三条谱线，而 P 态的氖原子则通过自发跃迁落到 1S 态，再和管壁碰撞，回到基态．

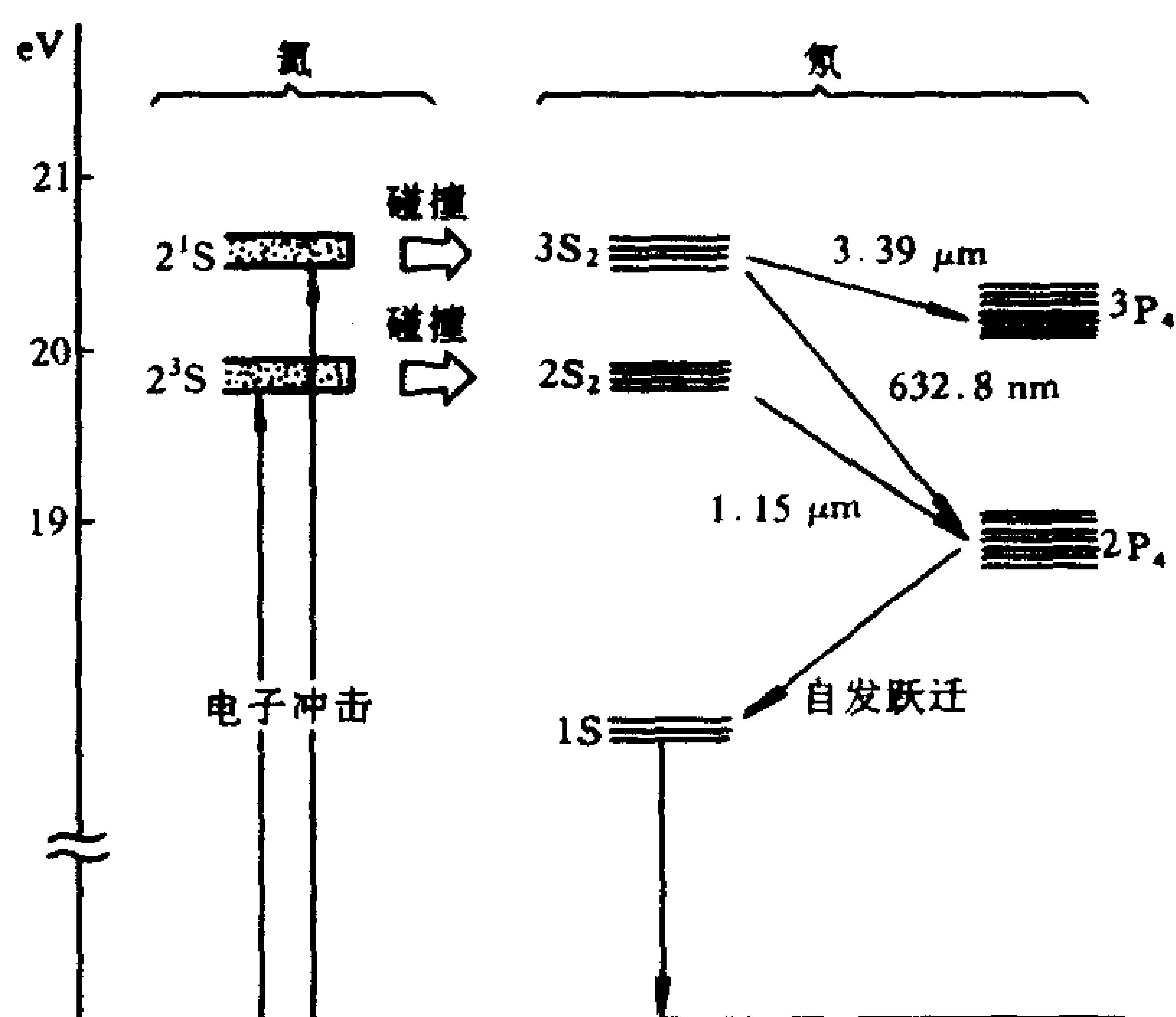


图 A-1-16

He-Ne 激光器在可见光区的输出是波长 632.8 nm 的单色红光．普通物理实验室常用管长 250 mm 的小型激光管，连续输

出功率约为 2～3 mW，而管长 1 000 mm 的激光管，连续输出可达 30～40 mW. 每一种规格的激光器都必须配用合适的工作电源，方能正常工作. 小功率 He－Ne 激光器电源直流高压达 1～2 kV. 使用中应注意电源极性不能接反. 正极接激光器阳极，负极接圆筒状的阴极，且应使激光器工作电流保持在 3～6 mA 之间，不宜过大.

选用激光器的根据除了输出波长的功率，另一主要性能指标是工作模式的稳定，因为激光器模式的变化会导致全息实验的失败. 对于横模，简单的检查方法是直接用肉眼观察激光的远场光斑，应选用光强分布为高斯型的圆型平滑光斑的激光管，而不宜选用有对称分布的双瓣或多瓣光斑的激光管. 对于纵模，可应用多光束干涉原理检查.

激光器点燃后，应稳定半小时后再使用，以防止由于谐振腔内的温度升高，使腔长发生变化而导致模式的变化. 要注意保护反射镜的多层介质膜，清除尘埃，防止潮湿、漏气. 激光器长期不使用时，仍应经常点燃驱湿，如发现激光器中毛细管放电颜色发蓝时，表示管中气体的成分已发生变化，只能调换这只激光器.

另外，光学实验中使用的固体发光二极管是一种固体发光光源，常用来作为讯号灯、显示光源（晶体数码管），有时也可用于光电效应.

光源的选择和使用的注意事项：

（1）根据使用要求合理地选择光源的种类

由于光源的类型很多，性能的差异也很大，而且各有其适用范围和特定的工作条件，因此实验时必须合理地选择光源. 例如，要产生一种平行光，就只能选用几何尺寸较小的点光源（6 V 汽车灯或 12 V/50 W 溴钨灯），放在会聚透镜的焦点处. 为了获得清晰干涉条纹，必须选用单色性好的激光光源（如 He－Ne 激光器等）. 总之，选用光源既要能满足实验的实际需要，又必须同时兼顾节能原则，能使用小功率的决不滥用大功率的电光源.

(2) 注意使用条件、遵守安全操作、延长灯管寿命

1) 使用前必须了解各种电光源的使用条件:是工作在交流状态抑或工作在直流状态、工作电压的额定值是多少等. 使用汞灯、钠灯等气体放电光源时,必须检查在确认有与灯管匹配的限流器接入电路后,方可点燃使用.

2) 注意眼的防护. 汞灯除发出可见光外,还有较强的紫外线,紫外线对眼睛有强烈的刺激作用,容易引起灼伤. 激光的高亮度对眼睛也有损害. 因此实验时要注意防护,尽量避免眼睛直接对着光源,最好戴防护眼镜.

3) 高压电源有触电危险,使用时禁止用手直接触摸电极和导线,电源外壳要接地.

4) 灯管必须按规定方式安放. 或垂直点燃,或水平横放,要防止颠倒、倾斜、震动、破损,废管也要妥善处理.

附录 A－2　基本物理常量表

表 A－2－1　基本物理常量

物理常量名称	符号	数　　值	单　　位
阿伏加德罗常数	N_A	$6.022\ 136\ 7\times 10^{23}$	mol^{-1}
玻耳兹曼常数	k	$1.380\ 658\times 10^{-23}$	$J\cdot K^{-1}$
电子电荷	e	$1.602\ 177\ 33\times 10^{-19}$	C
电子荷质比	e/m	$1.758\ 819\ 62\times 10^{11}$	$C\cdot kg^{-1}$
电子静止质量	m	$9.109\ 389\ 7\times 10^{-31}$	kg
第一辐射常量($2\pi hc^2$)	c_1	$3.741\ 774\ 9\times 10^{-16}$	$W\cdot m^2$
第二辐射常量(hc/k)	c_2	0.014 387 69	m·K
普朗克常量	h	$6.626\ 075\ 5\times 10^{-34}$	J·s
真空中光速	c	$2.997\ 924\ 58\times 10^{3}$	$m\cdot s^{-1}$
斯忒藩－玻耳兹曼常量	σ	$5.670\ 51\times 10^{-8}$	$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}$
精细结构常量	α	$7.297\ 353\ 08\times 10^{-3}$	
里德伯常量	R_∞	$1.097\ 373\ 153\ 4\times 10^{7}$	m^{-1}
维恩位移常量	b	$2.897\ 756\times 10^{-3}$	m·K

表 A－2－2　各种物质的折射率(对 $\lambda_D=589.3$ nm)

a. 一些气体的折射率*

物质名称	折 射 率
空　　气	1.000 292 6
氢　　气	1.000 132
氮　　气	1.000 296
氧　　气	1.000 271
水 蒸 气	1.000 254
二氧化碳	1.000 488
甲　　烷	1.000 444

* 在正常温度和气压下.

b. 一些液体的折射率

物质名称	温度/℃	折射率
水	20	1.333 0
乙　　醇	20	1.361 4
甲　　醇	20	1.328 8
苯	20	1.501 1
乙　　醚	22	1.351 0
丙　　酮	20	1.359 1
二硫化碳	18	1.625 5
三氯甲烷	20	1.446
甘　　油	20	1.474
加拿大树胶	20	1.530

c. 一些晶体及光学玻璃的折射率

物质名称	折 射 率
熔凝石英	1.458 43
氯化钠(NaCl)	1.544 27
氯化钾(KCl)	1.490 44
萤石(CaF_2)	1.433 81
冕牌玻璃 K6	1.511 10
冕牌玻璃 K8	1.515 90
冕牌玻璃 K9	1.516 30
重冕玻璃 ZK6	1.612 60
重冕玻璃 ZK8	1.614 00
钡冕玻璃 BaK2	1.539 90
火石玻璃 F8	1.605 51
重火石玻璃 ZF1	1.647 50
重火石玻璃 ZF6	1.755 00
钡火石玻璃 BaF8	1.625 90

d. 一些单轴晶体的 n_o 和 n_e

物质名称	n_o	n_e
方 解 石	1.658 4	1.486 4
晶态石英	1.544 2	1.553 3
电　　石	1.669	1.638
硝 酸 钠	1.587 4	1.336 1
锆　　石	1.923	1.968

e. 一些双轴晶体的光学常数

物质名称	n_α	n_β	n_γ
云　　母	1.560 1	1.593 6	1.597 7
蔗　　糖	1.539 7	1.566 7	1.571 6
酒 石 酸	1.495 3	1.535 3	1.604 6
硝 酸 钾	1.334 6	1.505 6	1.506 1

表 A-2-3　一些常用谱线波长

元　素	λ/nm	元　素	λ/nm	元　素	λ/nm
氢(H)	656.28(H_α)	氦(He)	438.79	氖(Ne)	633.44
	486.13(H_β)		414.38		630.48
	434.05(H_γ)		412.08		626.65
	410.17(H_δ)		402.62		621.73
	397.01(H_ε)		396.47		616.36
	388.90(H_ζ)		388.86		614.31
氦(He)	706.52	氖(Ne)	692.95		609.62
	667.81		671.70		607.43
	587.56		667.83		603.00
	504.77		659.90		597.55
	501.57		653.29		594.48
	492.19		650.65		588.19
	471.31		640.22		585.25
	447.15		638.30		582.02

续表

元　素	λ/nm	元　素	λ/nm	元　素	λ/nm
氖(Ne)	576.44	钠(Na)	589.592	钙(Ca)	396.85
	540.06		588.995		393.37
	534.11	钾(K)	769.90	钡(Ba)	553.55
	533.08		766.49		493.41
锂(Li)	670.79		404.72		455.40
	610.36		404.41		
	460.29				

表 A-2-4　可见光区定标用的已知波长

汞(Hg)发射光谱

λ/nm	颜　色	相对强度	λ/nm	颜　色	相对强度
690.72	深红	弱	546.07	绿	很强
671.62	深红	弱	535.40	绿	弱
623.44	红	中	496.03	蓝绿	中
612.33	红	弱	491.60	蓝绿	中
589.02	黄	弱	435.84	蓝紫	很强
585.94	黄	弱	434.75	蓝紫	中
579.07	黄	强	433.92	蓝紫	弱
578.97	黄	强	410.81	紫	弱
576.96	黄	强	407.78	紫	中
567.59	黄绿	弱	404.66	紫	强

镉(Cd)发射光谱

λ/nm	颜　色	相对强度	λ/nm	颜　色	相对强度
643.85	红	很强	479.99	蓝	强
632.52	红	弱	467.82	蓝	强
609.92	橙	强	466.23	蓝	弱
508.58	绿	强	441.46	蓝	弱

表 A-2-5 紫外光区定标用的已知波长

汞(Hg)发射光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
390.64	弱	289.36	弱
370.42	弱	280.40	弱
366.33	很 强	275.97	弱
365.01	很 强	275.28	强
334.15	强	269.90	弱
313.16	强	265.30	强
312.57	强	253.65	很 强
302.25	强	248.20	弱
296.73	强	239.94	弱
292.54	弱	237.83	弱

镉(Cd)发射光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
361.05	很 强	286.83	弱
346.62	很 强	283.69	强
340.37	强	277.50	弱
326.11	强	276.39	弱
325.25	强	274.86	弱
313.32	强	228.80	很 强
308.08	强	226.50	弱
298.06	很强	214.44	弱
288.08	强		

表 A-2-6 近红外区定标用的已知波长

汞(Hg)发射光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
773	弱	1 530	强
925	弱	1 692	强
1 014	强	1 707	强
1 129	强	1 833	弱
1 357	强	1 970	弱
1 367	强	2 250	弱
1 395	弱	2 325	弱

铯(Cs)发射光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
852.11	很 强	894.35	很 强

钕镨玻璃吸收光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
808	强	1 220	弱
880	强	1 517	强
1 067	弱	1 918	强

苯(C_6H_6)吸收光谱

λ/nm	相对强度	λ/nm	相对强度
1 140	强	2 150	强
1 671	强	2 464	强

表 A-2-7　几种常用激光器的主要谱线波长

氦氖激光	氦镉激光	氩离子激光	二氧化碳激光	红宝石激光	钕激光器
632.8 nm	441.6 nm	528.70 nm	10.6 μm	694.3 nm	1.35 μm
	325.0 nm	514.53 nm*		693.4 nm*	1.336 μm
		501.72 nm		510.0 nm	1.317 μm
		496.51 nm		360.0 nm	1.06 μm*
		487.99 nm*			0.914 μm
		476.49 nm			
		472.69 nm			
		465.79 nm			
		457.94 nm			
		454.50 nm			
		437.07 nm			

* 表示最强的谱线.

表 A-2-8　常用棱镜材料的最佳工作光谱区

棱　镜　材　料	适　用　范　围
光学玻璃	0.36 μm~2.5 μm
熔融石英	0.20 μm~2.5 μm
晶体石英	0.20 μm~0.60 μm 2 μm~3.5 μm
萤石(CaF_2)	0.13 μm~0.20 μm 3 μm~7 μm
氟化锂(LiF)	0.11 μm~0.20 μm 2 μm~5 μm
氟化钠(NaF)	0.13 μm~0.20 μm 3 μm~8 μm
氯化钠(NaCl)	0.20 μm~0.40 μm 5 μm~15 μm
氯化钾(KCl)	0.20 μm~0.40 μm 5 μm~18 μm
溴化钾(KBr)	10 μm~25 μm
KRS-5(TlBrI)	25 μm~40 μm
碘化铯(CsI)	25 μm~50 μm

表 A-2-9　几种纯金属的“红限”波长及脱出功(功函数)

金　属	λ_0/nm	W/eV	金　属	λ_0/nm	W/eV
钾(K)	550.0	2.2	汞(Hg)	273.5	4.5
钠(Na)	540.0	2.4	金(Au)	265.0	5.1
锂(Li)	500.0	2.4	铁(Fe)	262.0	4.5
铯(Cs)	460.0	1.8	银(Ag)	261.0	4.0

表 A-2-10　光在有机物中偏振面的旋转

旋光物质,溶剂、质量浓度	波长/nm	旋光率 ρ / (°)·cm³·dm⁻¹·g⁻¹	旋光物质,溶剂、质量浓度	波长/nm	旋光率 ρ / (°)·cm³·dm⁻¹·g⁻¹
葡萄糖+水	447.0	96.62	酒石酸+水	350.0	−16.8
$c=5.5\times$	479.0	83.88	$c=28.62\times$	400.0	−6.0
10^{-2}g/cm³	508.0	73.61	10^{-2}g/cm³	450.0	+6.6
($t=20$℃)	535.0	65.35	($t=18$℃)	500.0	+7.5
	589.0	52.76		550.0	+8.4
	656.0	41.89		589.0	+9.82
蔗糖+水	404.7	152.8	樟脑+乙醇	350.0	378.3
$c=26\times$	435.8	128.8	$c=34.70\times$	400.0	158.6
10^{-2}g/cm³	480.0	103.05	10^{-2}g/cm³	450.0	109.8
($t=20$℃)	520.9	86.80	($t=19$℃)	500.0	81.7
	589.3	66.52		550.0	62.0
	670.8	50.45		589.0	52.4

表 A-2-11　一毫米厚石英片的旋光率　　　温度 20℃时

波长/nm	344.1	372.6	404.7	435.9	491.6	508.6	589.3	656.3	670.8
旋光率 ρ / (°)·cm³·dm⁻¹·g⁻¹	70.59	58.86	48.93	41.54	31.98	29.72	21.72	17.32	16.54

表 A－2－12　亮度单位换算

换算系数 单位	单　　位				
	坎每平方米 (cd/m²) [尼特(nt)]	坎每平方厘米 (cd/cm²) [熙提(sb)]	坎每平方英尺 (cd/ft²)	坎每平方英寸 (cd/in²)	英尺朗伯 (fL)
坎每平方米 (cd/m²)	1	1 000	10.764	1 550	3.426
坎每平方厘米 (cd/cm²)	0.000 1	1	0.001 076	0.155	0.000 342 6
坎每平方英尺 (cd/ft²)	0.092 9	929	1	144	0.318 3
坎每平方英寸 (cd/in²)	0.000 645	6.452	0.006 94	1	0.002 211
英尺朗伯 (fL)	0.291 9	2 919	31 416	452.4	1

表 A－2－13　照度单位换算

换算系数 单位	单　　位			
	英尺坎德拉 (ft·cd)	勒克斯(lx) [流明每平方米]	辐透 (ph)	毫辐透 (mph)
英尺坎德拉 (ft·cd)	1	0.072 9	929	0.929
流明每平方米 (lm/m²)	10.764	1	10 000	10
辐　透 (ph)	0.001 08	0.000 1	1	0.001
毫辐透 (mph)	1.076	0.1	1 000	1

表 A-2-14 数学常数表

常数	数　　值	log	常数	数　　值	log
π	3.141 592 653 6	0.497 149 872 7	$\sqrt{3}$	1.732 050 807 6	0.238 560 627 4
2π	6.283 185 307 2	0.798 179 868 4	$\sqrt{10}$	3.162 277 660 2	0.500 000 000 0
4π	12.566 370 614 4	1.099 209 864 0	$\ln \pi$	1.144 729 885 8	0.058 703 021 2
π^2	9.869 604 401 1	0.994 299 745 4	e^{π}	23.140 692 632 8	1.364 376 353 8
$\sqrt{\pi}$	1.772 453 850 9	0.248 574 936 3	1rad	57.295 779 513 1°	1.758 122 632 4
e	2.718 281 828 5	0.432 944 819	1rad	3 437.746 770 78′	3.536 273 882 8
$\log e$	0.434 294 481 9	$\overline{1}$.637 784 311 3	1rad	206 264.806 25″	5.314 425 133 2
$\ln 10$	2.302 585 093 0	0.362 215 688 7	1°	0.017 453 292 5 rad	$\overline{2}$.241 877 367 6
2	2	0.301 029 995 7	1′	0.000 290 888 2 rad	$\overline{4}$.463 726 117 2
$\sqrt{2}$	1.414 213 562 4	0.150 514 997 8	1″	0.000 004 848 1 rad	$\overline{6}$.685 574 866 8

［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝普通物理实验（三、光学部分）　　第三版
作者＝杨述武主编
页数＝２７７
ＳＳ号＝１０３４６８４３
出版日期＝１９８３年０６月第１版